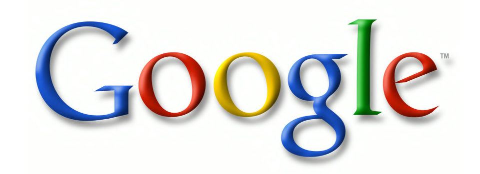

Google







Dr. J. Fricks

Physikalische Technik

oder

Anleitung zu Experimentalvorträgen

sowie zur

Selbstherstellung einfacher Demonstrationsapparate

Erster Band — Zweite Abteilung

Dr. J. Fricks

Physikalische Technik

oder

Anleitung zu Experimentalvorträgen

sowie zur

Selbstherstellung einfacher Demonstrationsapparate

Siebente

vollkommen umgearbeitete und stark vermehrte Auflage

von

Dr. Otto Lehmann

Professor der Physik an der technischen Hochschule in Karlsruhe

---

In zwei Bänden

Erster Band Zweite Abteilung

Mit 1905 in den Text eingedruckten Abbildungen

Braunschweig

Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn

1905

Published November 1, 1905.

Inhaltsverzeichnis des ersten Bandes.

Zweite Abteilung.

Zweiter Teil.

Anleitung zu physikalischen Demonstrationen.

Erstes Kapitel.

*

Zweites Kapitel.

Drittes Kapitel.

Viertes Kapitel.

Fünftes Kapitel.

Sechstes Kapitel.

Siebentes Kapitel.

Achtes Kapitel.

Neuntes Kapitel.

Zehntes Kapitel.

Elftes Kapitel.

Zwölftes Kapitel.

Zweiter Teil.

Anleitung zu physikalischen Demonstrationen.

Messungen.

Manche Lehrbücher beginnen mit Auseinandersetzungen über die Aufgabe der Physik. Ich halte dies nicht für zweckmäßig. Die Aufgabe der Physik vermag der Schüler erst richtig zu erfassen, wenn er den wesentlichen Inhalt derselben bereits beherrscht, nicht vorher. Außerdem dürfte bei den meisten Schülern gar kein Bedürfnis nach einer derartigen Aufklärung mehr oder minder philosophischer Natur vorhanden sein. Weit eher dürfte es sie interessieren, zu erfahren, wie denn diese Wissenschaft entstanden ist und welche Männer sie im Laufe der Zeit zu ihrer gegenwärtigen Vollkommenheit ausgebildet haben. Damit ist natürlich nicht etwa gemeint, daß der Unterricht mit einer kurzen Darlegung der Geschichte der Physik beginnen soll, die dem Schüler aus gleichen Gründen nicht minder unverständlich bleiben würde, wie die erwähnten Erörterungen erkenntnistheoretischer Natur. Es soll vielmehr während der Behandlung des Lehrstoffes immerfort auf die historische Entwickelung der Kenntnisse hingewiesen, auch soll dann und wann Wissenswertes aus den Lebensschicksalen der berühmtesten Forscher berührt werden.

Ich pflege deshalb zu beginnen mit einem Hinweis darauf, daß jeder Mensch naturgemäß das Bedürfnis hat, die Vorgänge, die er wahrnimmt, zu begreifen [1]), und daß dies schon in den ältesten Zeiten, von welchen wir Kunde haben, sich so verhielt.

Beobachten wir einen Schmied bei der Arbeit, so wird uns zunächst manches nicht recht klar sein, nach und nach werden wir indes das Wesentliche dieses Handwerks erfassen, falls er uns die nötigen Erklärungen gibt, und wir haben die Arbeitsweise vollständig „begriffen“, wenn wir imstande sind, uns selbst an Stelle des Schmiedes zu stellen, wenigstens in Gedanken.

Manche von den Vorgängen, welche wir tagtäglich beobachten, werden durch Menschen verursacht oder durch andere lebende Wesen, deren Wirkung wir natürlich, falls wir sie nur genau kennen, im Geiste nachahmen, somit begreifen können. Sehr viele Vorgänge dagegen vollziehen sich ohne sichtbares Zutun eines lebenden Wesens, und es fällt uns schwer, ihre Ursache und ihren Verlauf zu begreifen, die Erscheinung im Geiste selbst hervorzubringen, d. h. durch Wirkung unserer Muskelkraft, die ausgelöst wird durch unseren Willen, unser Ich, unsere Person.

---

[1]) Nicht allein aus Wißbegierde, sondern weil manche nützlich, andere schädlich sind, und es deshalb von Interesse ist, Einfluß darauf zu haben.

1. Kräfte [1]). Wenn ich einen Wagen schiebe, eine Drehbank trete, eine Trompete blase; wenn ich pfeife, singe, ein Streichholz anzünde, einen Körper elektrisch errege oder einen Stahlstab durch Streichen magnetisch mache, so empfinde ich in allen diesen Fällen ein und dasselbe Gefühl, das einer Muskelanstrengung oder einer Kraftleistung. Ich fühle, daß ich durch meine Kraft die Ursache bin, daß der Wagen in Bewegung kommt, der Trompetenton erschallt, das Streichholz sich entflammt und der Stahlstab magnetisch wird.

Sehe ich einen anderen Menschen, der dergleichen Arbeiten verrichtet, so fühle ich zwar seine Anstrengung nicht, ich bin aber überzeugt davon, daß er sie empfindet, weil er genau gleich konstituiert ist wie ich und weil ich selbst an seiner Statt diese Empfindung hätte.

Ist es ein Pferd oder eine Dampfmaschine, welche Arbeiten verrichten, dann denke ich mich auch in diesem Falle an deren Stelle versetzt und fühle die Kraftleistung, spreche somit von der Kraft des Tieres oder der Dampfmaschine, gleichgültig, ob das Tier davon dieselbe Empfindung hat wie ich, und obschon ich überzeugt bin, daß die Maschine ihre Kraft absolut nicht fühlt.

Wenn eine eiserne Kugel auf einen Tisch gelegt wird, unter dessen Oberfläche Elektromagnete verborgen sind, die von einem mir nicht sichtbaren Manne in Tätigkeit gesetzt werden, so sehe ich nur, daß die Kugel eigentümliche Bewegungen ausführt. Trotzdem habe ich die volle Überzeugung, daß eine Kraft, etwas von der Art wie meine Muskelkraft, die Bewegungen hervorruft, und ich bin erstaunt, kein Wesen zu sehen, welches die Kraft ausübt [2]).

Auf der Wirkung verborgener Kräfte beruht das Merkwürdige vieler sogenannter Zauberkunststücke. Beispielsweise benutze ich eine magische Kerze, bestehend aus einem mit weißem Papier umwickelten, in einem Glasrohre steckenden Eisendrahtbündel, welches von einer äußerlich als Leuchter ausgebildeten Drahtspirale umgeben ist. Wird ein kupfernes Löschhorn aufgesetzt, so fliegt dasselbe auf Befehl in die Höhe, indem alsdann ein Gehilfe durch eine verborgene Leitung Wechselstrom in die Spirale einleitet, welcher durch sogenannte „elektroinduktive“ Abstoßung die genannte Wirkung hervorbringt. Durch Verbindung eines hohlen Dochtes mit der Gasleitung und elektrischer Zündvorrichtung ist ferner dafür gesorgt, daß die Kerze sich wieder von selbst entzündet; durch nicht wahrnehmbare Vertauschung der Gasleitung mit der Luftleitung außerhalb des Zimmers kann bewirkt werden, daß sie plötzlich erlischt und ein genähertes Streichholz ausbläst, durch Anschließen an die Wasserleitung, daß sie einen größeren Fidibus mit Wasser ablöscht, durch Umleiten von Gleichstrom, daß sie eine eiserne Putzschere festhält u. s. w.

---

[1]) Diese Auseinandersetzungen sind nicht die allgemein üblichen. Gewöhnlich findet man abstrakte Definitionen des Kraftbegriffes, die dem Schüler kaum verständlich werden dürften und auch in wissenschaftlicher Hinsicht, wie weiter unten gezeigt wird, nicht einwandfrei sind. Obige Auffassung wurde zuerst in der vorigen Auflage dieses Buches dargelegt. Ich war dazu gelangt durch die gleichzeitige Bearbeitung des Buches über Molekularphysik (Leipzig 1888, W. Engelmann), wo man dieselben ebenfalls ausgeführt findet. — [2]) Ich pflege diese Erscheinung zu demonstrieren mittels großer Nägel, mit welchen der Experimentiertisch bestreut wird. Wird durch eine unter der Tischplatte verborgene große Drahtrolle ein starker Strom geleitet, so richten sich die Nägel plötzlich auf und rücken zu einem Kreis zusammen. Der Stromschlüssel befindet sich natürlich in einem anderen Raum und wird durch einen Gehilfen betätigt, welcher durch nicht wahrnehmbare Zeichen dazu veranlaßt wird. Die Leitungen sind in den Tischfüßen verborgen.

Hätten wir außer dem Apparat von motorischen Nerven und Muskeln noch einen andern, mittels dessen wir Naturerscheinungen willkürlich hervorrufen könnten und dessen Leistungen wir empfinden würden, dann wäre es uns wohl möglich, uns als Ursache einer Naturerscheinung etwas anderes vorzustellen als eine Kraft. Da dies nicht der Fall ist, so fehlt uns jede Möglichkeit, eine Erscheinung durch etwas anderes als durch eine Kraft hervorgerufen zu denken, und darum schreiben wir auch der Maschine eine Kraft von der Art der unserigen zu. Einzig als Kraftwirkung können wir eine Naturerscheinung „begreifen“[1]).

Die „Erklärung“ einer Naturerscheinung ist stets nur dann vollkommen befriedigend, wenn wir die Erscheinung auf die Wirkung einer Kraft zurückgeführt haben, eine einfache „Beschreibung“[2]) genügt uns nicht.

So hat schon im grauesten Altertum, vor etwa 6000 Jahren, die Bewegung der Gestirne, insbesondere der Sonne und des Mondes in hohem Grade die Aufmerksamkeit der Denkenden auf sich gelenkt, nicht nur durch das Großartige, Wunderbare der Erscheinung, sondern namentlich auch infolge der hohen Bedeutung für das Gedeihen der Feldfrüchte und damit der Nahrungsmittel überhaupt, ohne welche lebende Wesen nicht bestehen können.

Wer lenkt die Sonne auf ihrer Bahn?

Das Bestreben, diese Erscheinungen zu begreifen, führte deshalb zunächst zur Vorstellung der Existenz unsichtbarer, mit übernatürlichen Kräften begabter lebender Wesen; es entstand der Glaube an dem Menschen wohlgesinnte Naturgottheiten, an Götter des Lichts, wie Amun (Ägypten) und Baal (Babylonien), aber auch an ihnen und den Menschen feindlich gesinnte Dämonen der Finsternis. Furcht und Schrecken erregten schon seit den ältesten Zeiten Donner und Blitz. Aber wer schleudert den Blitz?

Mit Gewalt war gegen solche übernatürliche Wesen nichts auszurichten, man mußte versuchen sie durch Gebete und Opfer günstig zu stimmen. Es entstand der Stand der Magier (Priester), zu deren Obliegenheiten natürlich auch gehörte, aus der Konstellation der Gestirne den Willen oder die Gunst oder Ungunst der Götter zu erforschen (Astrologie), somit den Lauf der Gestirne genau zu beobachten und aufzuzeichnen. Hierzu waren Sternwarten notwendig, welche in der Tat schon in frühester Zeit (vor 6000 Jahren) existierten und naturgemäß mit den Tempeln innig verbunden waren (babylonischer Turm). Die Genauigkeit der Beobachtungen erreichte einen so hohen Grad, daß jene Magier im stande waren, nicht nur die Gesetzmäßigkeiten in der Bewegung der Gestirne (soweit mit den damaligen Hilfsmitteln und ohne Kenntnis der Theorie überhaupt möglich) zu erkennen, sondern auch wunderbare und schreckenerregende Naturereignisse, wie Sonnen- und Mondfinsternisse, vorauszusagen und sogar scheinbar auf ihren Befehl eintreten zu lassen.

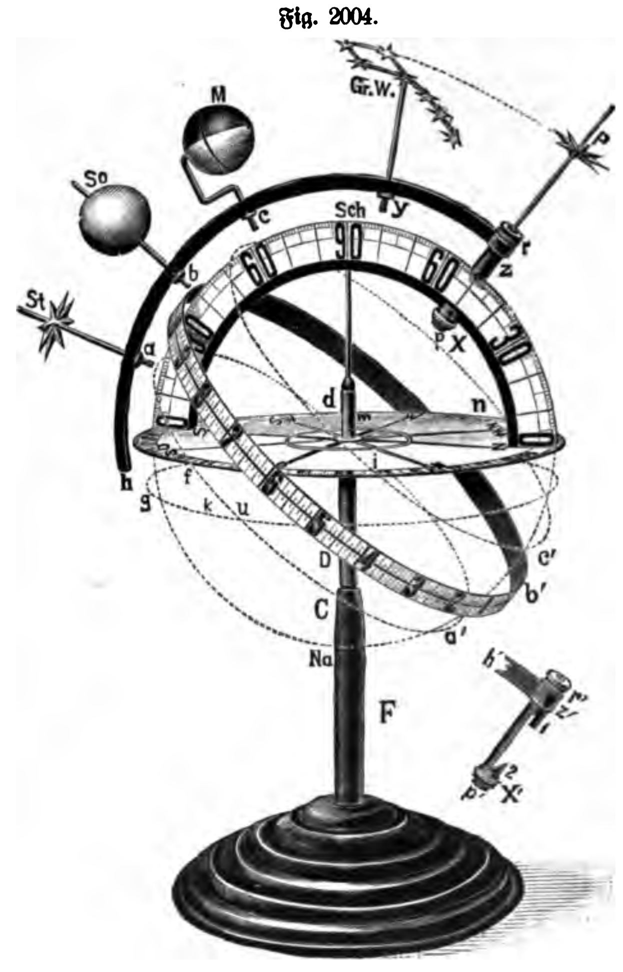
---

[1]) Schon vor mehr als 2000 Jahren stellte Protagoras den Satz auf: „Der Mensch ist das Maß aller Dinge“. — [2]) Vergl. G. Kirchhoff, Vorlesungen über mathematische Physik, Leipzig 1876, Teubner. Warburg, Lehrb. d. Experimentalphysik, 6. Aufl., Tübingen 1902, Mohr, sagt: „Eine Tatsache erklären heißt in den Naturwissenschaften nichts anderes als sie einem Satze unterordnen, welcher eine mehr oder minder große Anzahl von Tatsachen zusammenfaßt. Einen solchen Satz nennt man ein Naturgesetz“. Siehe auch O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann, S. 150.

2. Himmelsglobus und Horizontarium. Ein Apparat, welcher die Bewegung der Gestirne um die Erde gut zu demonstrieren gestattet, wurde konstruiert von Mang[1]). Nachfolgend gebe ich einzelne Stellen der Gebrauchsanweisung.

„Bei der Darstellung der Vorbegriffe mittels des Horizontariums (Fig. 2004) bleiben Sonne (*So*), Mond (*M*), Großer Wagen (*Gr W*), Polarstern (*P*) und Experimentalstern (*St*) noch weg. Die Erde wird dann durch die grüne Horizontscheibe *NWS* repräsentiert, die Himmelshalbkugel durch den Mittagskreis *SSchN*; *d* ist der Beobachter, *m* sein Standpunkt, *Sch* sein Scheitelpunkt, *mSch* die Scheitellinie u. s. w. Klappt man den Kreis *bb'* bis *Sch* auf, so erhält man den Himmel als Vollkugel; *Na* ist dann der Fußpunkt des Beobachters *d* u. s. w.

Fig. 2004.



Zur Darstellung der scheinbaren Bewegung der Gestirne wird der Zapfen *xz* für die betreffende Polhöhe aufgeschraubt (z. B. für Mainz auf 50°), die Führung *rh* aufgeschoben, desgleichen der Polarstern *P* und der Große Wagen (*Gr. W.*).

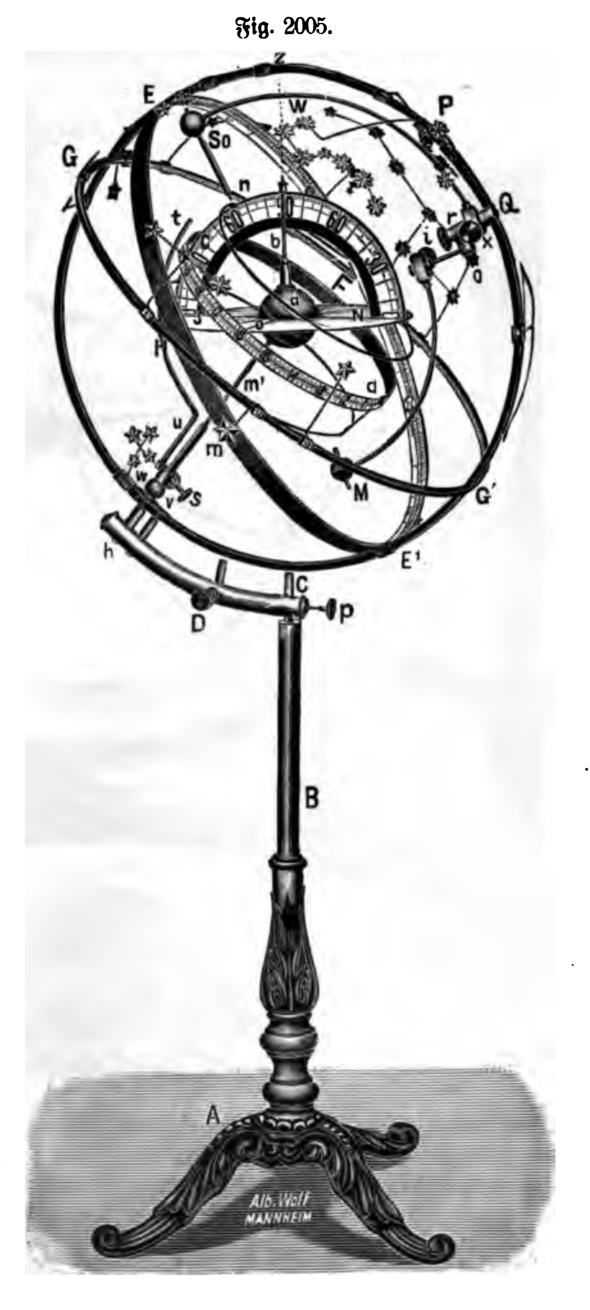
Zunächst wird die bekannte Regel, wie man mittels der Hinterräder des Großen Wagens den so wichtigen Polarstern *P* findet, erklärt, dann die tägliche scheinbare Drehung des Himmels nachgeahmt, indem man den Großen Wagen um den Polarstern *P* führt. Ebenso einfach kann man mittels des beliebig aufschraubbaren Experimentalsternes *St* die scheinbare Bahn jedes beliebigen Sternes nachweisen. Wie den Großen Wagen und Polarstern, so kann der Lehrer den Schülern auch noch die Plejaden (Siebengestirn), sowie den herrlichen Orion u. s. w. am Himmel zeigen und die Wunder des Sternenhimmels in schlichter Weise erklären. Der Blick der Jugend wird dann für immer auf den gestirnten Himmel

[1]) Astronomischer Verlag von A. Mang, Reallehrer an der Oberrealschule in Heidelberg. Das Horizontarium (Fig. 2004), zum Gebrauch in Elementarschulen geeignet, kostet 32 Mk.; der Universalapparat (Fig. 2005) für den höheren Unterricht 250 Mk. (Kasten dazu 16 Mk.).

mit seiner unvergänglichen Majestät und Schönheit gerichtet bleiben, „wo nie die Sterne irren“.

Die Armillarsphäre des Universalapparates (Fig. 2005) ist 150 cm hoch und besteht aus dem Stativ *ABC*, aus dem verstellbaren Hebel *Ch* mit der Himmelsachse *hm*, um welche die eigentliche Sphäre *GPG'wG* rotiert. Dieselbe ist höchst einfach, indem sie nur aus zwei Grundkreisen, dem Kolur *GPG'wG* und dem Himmelsäquator *GG'* besteht. Die scheinbare Sonnenbahn *EE'* oder Ekliptik kann beliebig eingesetzt oder weggenommen werden. Sie ist vernickelt, trägt innen den ewigen Kalender und ist schmal, so daß sie, selbst wenn sie aufgesetzt ist, nicht den Einblick ins Innere stark beeinträchtigt wie der plumpe, 20° breite Zodiakus anderer Sphären. Sämtliche Kreise sind mehrfach graduiert. Die Bewegung von Sonne und Mond erfolgt um den Pol *Q* der Ekliptik frei und so sicher, daß alle Auf- und Untergänge und Kulminationshöhen u. s. w. bis auf etwa 1 bis 2° genau werden — eine Genauigkeit, die für Schulzwecke bei weitem ausreicht, da die Schüler dann vollkommen überzeugt sind! Die Sphäre ist mit 21 Sternbildern geschmückt, welche einzeln beliebig aufgesetzt werden können, wie z. B. der Große Bär *W*, Fig. 2005. Stellt man den Apparat im Freien auf, orientiert ihn, zieht vom Mittelpunkte der Sphäre aus durch die einzelnen Sterne Radien und verlängert sie bis zum Himmel, so treffen sie auf die wirklichen Sterne. Steckt man noch die Planeten (als farbige Kügelchen) nach ihrer jeweiligen Deklination und Rektaszension auf, so kann man für jede beliebige Stunde des Jahres den Sternenhimmel nebst Sonnen-, Mond- und Planetenstand naturgetreu darstellen, also unendlich viele Stellungen erzeugen! Man kann auch die

Fig. 2005.



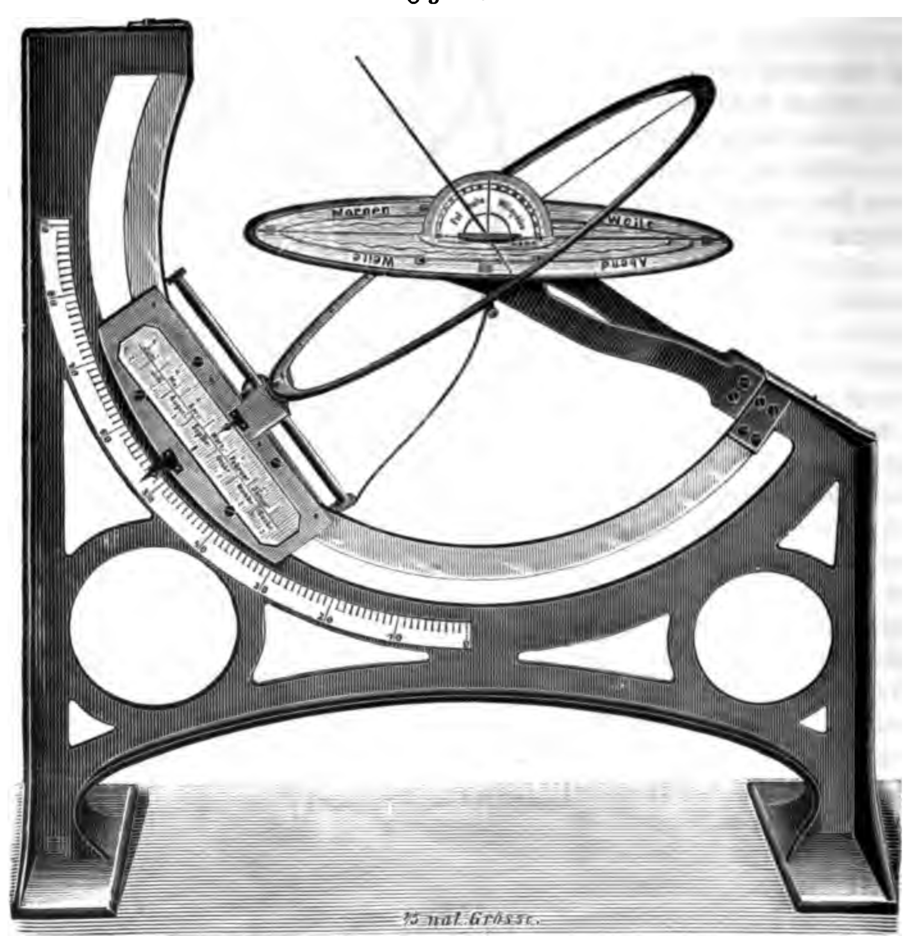
scheinbaren Bewegungen zeigen, wie sie sich unter dem Horizonte oder am Äquator, Nordpol oder jedem beliebigen anderen Punkte der Erde abspielen, welche direkt nicht zu beobachten sind; ferner die scheinbaren Sonnen- und Mondbewegungen und die Bedingungen für den Eintritt einer Finsternis.

Auch schon das einfache Horizontarium (Fig. 2004) ist hierzu ausreichend.

Mittels der auf *rh* verstellbaren Metallkugel *So* läßt sich der scheinbare Lauf der Sonne für jeden Tag nachahmen. *bb'* stellt den Tag- und Nachtbogen der



Fig. 2006.



Sonne am 21. März vor. In *c* beschreibt sie den nördlichen Wendekreis *cc'*, in *a* den südlichen *aa'*. Benutzt man *M* als Sommer-, *St* als Wintersonne, so kann man diese drei Sonnen zugleich ihre Tagkreise beschreiben lassen.

Ebenso naturgetreu und einfach lassen sich auch die scheinbaren Bewegungen des Mondes *M* und seiner Phasen hervorrufen, da derselbe halb schwarz, halb weiß und zugleich drehbar ist.

Alle diese scheinbaren Bewegungen können aber nicht bloß für unsere Breite, sondern auch für jede andere, also auch einen Beobachter am Nordpol, Äquator u. s. w. dargestellt werden, Dinge, die sich die Schüler ohne ein derartiges Hilfsmittel

ebensowenig richtig vorstellen können als z. B. auch die Bewegungen unter dem Horizont [1]).“

Fig. 2007.

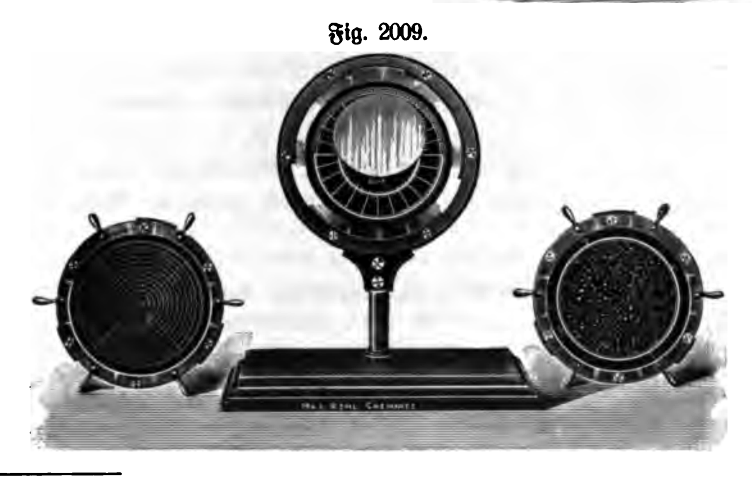


Einen Sternglobus nach K. Haas (Z. 5, 237, 1892), welcher die Änderungen, die der Sternhimmel für irgend einen Ort der Erde durch die Präzession erfährt, zeigt Fig. 2008. Der Globus ist um eine Achse drehbar, welche durch die Pole der Ekliptik geht. Der diese Achse

Fig. 2008.



Fig. 2009.



[1]) Einen Horizont nach Buth zeigt Fig. 2006 (E, 60). Einen Himmelsglobus aus Glas, Uranotrop genannt, liefert J. A. Bosch, Straßburg. Eine zusammenlegbare Sphäre (Coelo-Tellurium) nach Prof. A. Michalitschke (Z. 11, 310, 1898) ist zu beziehen von

haltende Ring I ist in dem Ringe II um eine Achse drehbar, die zur ersten senkrecht steht; dieser ist endlich mittels einer Achse, welche von den Schnittpunkten von I und II um je 90° absteht, in dem Ringe III drehbar, welcher sich in dem Azimutkreis A so verschieben läßt, daß der Achse xX jede beliebige Neigung gegeben werden kann.

Fig. 2009 (K, 33) zeigt eine rotierende Sternkarte des nördlichen Himmels für die Breite bis Leipzig. Der Apparat dient zur Demonstration der Bewegung der Zirkumpolarsterne und gestattet, den Sternhimmel für jede Stunde des Jahres sofort darzustellen, sowie die Aufgaben der Sternauf- und -untergänge, sowie ihrer Kulminationen in einfacher Weise zu lösen. Von den beiden drehbaren Scheiben ist die eine ohne, die andere mit Gradnetz ausgeführt.

3. **Winkel- und Längeneinheiten.** Es ist nicht zu verwundern, daß das Ansehen der Magier durch ihre Fähigkeit, den Eintritt so unbegreiflicher, die ganze Welt in Schrecken versetzender Ereignisse wie Verfinsterungen von Sonne und Mond genau vorherzusagen, ins Ungemessene steigen mußte, war doch damit scheinbar der direkte Beweis geliefert, daß sie zu jenen göttlichen Gewalten, welche den Lauf der Gestirne regelten, direkte Beziehungen hätten. Sie erlangten deshalb auch größten Einfluß auf die Leitung des Staatswesens, und vor allem wurde ihnen die Erziehung der Prinzen und derjenigen jungen Leute anvertraut, welche später leitende Stellungen einnehmen sollten; sie waren, wie wir heute sagen würden, die ersten Hochschullehrer oder Professoren [1]).

Die Feststellung der Regelmäßigkeiten in der Bewegung der Gestirne erforderte nun vor allen Dingen genaue Bestimmung ihres Ortes und Einheiten zur Ausführung dieser Messungen. In erster Linie kam dabei in Betracht die **Messung von Winkeln.**

Die noch heute übliche Einteilung des Kreises in 360 Grade ist bereits in jenen uralten Zeiten entstanden. Die Wahl beruht wohl darauf, daß sich ein Kreis durch Auftragen des Radius leicht in sechs gleiche Teile teilen läßt und ebenso, nachdem man einen halbiert hat, in 12, sodann durch nochmalige Halbierung in 24. Jeder dieser Teile enthält dann 15 Grade [2]); man gelangt also zu einzelnen Graden, indem man jeden zunächst in drei und alsdann jeden dieser in fünf gleiche Teile teilt. Es empfiehlt sich, eine solche Kreisteilung zu demonstrieren an einem Kreis von 1 m Radius, der auf starkes Zeichenpapier aufgetragen ist. Dieser wird auf einen quadratischen Rahmen aus Holz mit den nötigen Versteifungen aufgetragen und im Zentrum mit einer metallenen Öse versehen, durch welche die Achse eines Zeigers hindurchgeht.

W. Grund in Prag II, Myslikgasse 8, zum Preise von 80 fl. Über einen Himmelsglobus für Projektion siehe Adami, Z. 6, 70, 1892. Ducrue, Z. 9, 125, 1896, konstruierte den in Fig. 2007 dargestellten Himmelsglobus mit verstellbarem Rotationshorizont, bestehend aus einer Glaskugel von 30 cm Durchmesser, welche aus zwei mit Messingfassung versehenen abhebbaren Halbkugeln zusammengesetzt ist. Derselbe wird geliefert von der Firma Böhm u. Wiedemann, Mech. Werkstatt in München, Kaufingerstr. 20, zu 60 Mk.

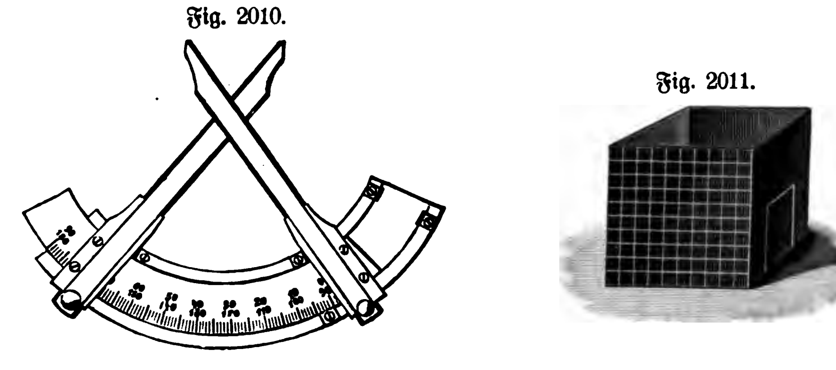
[1]) Daß der (Ober-)Priester bei den Römern Pontifex (Maximus) hieß, weist darauf hin, daß auch die technische Leitung des Brückenbaues wegen der nötigen genauen Kenntnis der Naturerscheinungen wenigstens in sehr alten Zeiten Sache der Priester war. — [2]) Die Anzahl Grade entspricht nämlich ungefähr der Anzahl Tage des Jahres.

Der Kreis wird zweckmäßig nicht nur in Grade geteilt, sondern auch in Centimeter, damit er die Größe der Winkel auch in Bogenmaß abzulesen gestattet, wobei als Einheit des Winkels (Radiant) derjenige gilt, dessen Schenkel einen Kreisbogen von der Länge des Radius einschließen, d. h. ein Winkel von 57,2958°.

Um die Größe eines gegebenen Winkels an einer solchen großen Kreisteilung abzulesen, benutze ich einen „Anlegegoniometer", ähnlich einem Zirkel, dessen Schenkel man mit den Schenkeln des gegebenen Winkels in Übereinstimmung bringt. Man legt ihn dann an den geteilten Kreis mit dem einen Schenkel an den Nullpunkt der Teilung, so daß die in die Öffnung fallende Zahl Grade leicht abgelesen werden kann. Natürlich kann man auch einen Winkelmesser (Transporteur) gewöhnlicher Art benutzen. Anlegegoniometer nach Fig. 2010 liefern Leybolds Nachf., Köln, zu 36 Mk., allseitig drehbare (Abbildung siehe weiter unten bei Kristallen) zu 60 Mk. (Vgl. auch Bd. I (1), S. 382 und 383.)

Außer dem Winkelmaß waren zur Feststellung der Gesetzmäßigkeiten der Natur auch Längen-, Flächen- und Körpermaße erforderlich, ebenso wie z. B. zur Feststellung der Ordnung des Grundbesitzes (Ausmessung der Felder), zur Regelung des Handelsverkehrs (Ausmessung der Waren) und zur Ausführung großer technischer Werke und Bauten (babylonischer Turm, Pyramiden). In der ältesten Zeit wurden als Längeneinheiten meist die Längen einzelner menschlicher Glieder (wobei natürlich diejenigen des Königs maßgebend waren) benutzt, wie ja auch heute noch die Ausdrücke: Fuß (Schuh), Elle, Spanne, Fingerbreite gebräuchlich sind. Mit diesen waren zugleich die Flächen- und Körpermaße (Quadratfuß, Kubikfuß u. s. w.) gegeben [1].

Fig. 2010. Fig. 2011.



Etwa vom zweiten Jahrtausend v. Chr. an hatte bereits die ganze damals bekannte Welt ihr wohlgeordnetes allgemein gültiges Maßsystem, welches als feste Längeneinheit die von dem König von Ur Dungi I. 2650 v. Chr. eingeführte babylonische Doppelelle = 0,993 m, zur Grundlage hatte [2]. Kleinere Einheiten wurden durch Einteilung derselben in eine bestimmte Zahl gleicher Teile gewonnen, was nach den Methoden, die bereits oben I (1), S. 597 besprochen wurden, keine Schwierigkeiten bereitet. Umgekehrt konnte man größere Einheiten leicht gewinnen durch Aneinanderreihung kleinerer mittels Lineal und Zirkel, wobei als Lineal

[1]) Ein Hohlwürfel zur Erklärung des Zusammenhanges der drei Maße (Fig. 2011) ist zu beziehen von Leppin u. Masche, Berlin, zu 2 Mk. — [2]) Die Länge ist (zufällig?) gleich der des Sekundenpendels für den 30. Breitegrad.

eventuell schon ein zusammengefalteter Papierstreifen, als Zirkel ein angelegter zweiter Papierstreifen ausreichend war.

Die Feststellung zahlreicher Gesetzmäßigkeiten in der Natur auf Grund genauer Messungen mußte im Laufe der Zeit notwendig zur Erkenntnis führen, daß im Reiche der leblosen Natur nicht wie in dem der Lebewesen Willkür herrscht, freier Wille des einzelnen, sondern strenge Gesetzmäßigkeit. Der Glaube an die Naturgottheiten wurde erschüttert, und es zeigen sich die Anfänge der Wissenschaft, beginnend mit Sokrates, der bekanntlich wegen Ableugnung der Götter den Giftbecher leeren mußte, seinem Schüler Plato, welcher seine Vorträge in dem als Akademie bezeichneten Gebäude hielt, und dessen noch berühmterem Schüler Aristoteles, welcher von 347 bis 343 v. Chr. im Lyceum in Athen dozierte und das erste Lehrbuch der Physik schrieb, betitelt: „φυσικὴ ἀκρόασις“. Von diesem Werke stammt der Titel unserer Wissenschaft. Das ganze Mittelalter hindurch war es fast das einzige Lehrbuch derselben, stand in höchstem Ansehen und war z. B. am akademischen Gymnasium (Lyceum) in Durlach, aus welchem das Karlsruher physikalische Institut hervorgegangen ist, noch bis zum Jahre 1674 im Gebrauch.

Der Bau von Kriegsmaschinen, der Schiffsbau und andere in das Gebiet der Ingenieurwissenschaften fallende Aufgaben trugen wesentlich dazu bei, die Kenntnisse zu erweitern. In dem von Alexander dem Großen, Aristoteles' Schüler, neu gegründeten Alexandria erstand die erste eigentliche Hochschule, das Museum (mit Internat), welches im Verein mit anderen Philosophenschulen, den sogenannten Athenäen, selbst nach Errichtung des Römerreichs und nach Eroberung Alexandrias durch die Araber sich durch Erhaltung und Förderung der Wissenschaft große Verdienste erworben hat. Dort wirkten als Physiker Ktesibios, der Erfinder der Pumpe (Feuerspritze), und dessen Schüler Heron, der Erfinder des Heronsballs und der Dampfturbine, ferner als Mathematiker Ptolemäus, hauptsächlich bekannt durch seine Trigonometrie.

Da trigonometrische Funktionen häufig bei physikalischen Rechnungen gebraucht werden, empfiehlt es sich, den Zeiger des oben (S. 639) erwähnten großen Winkelmessers mit einer Verlängerung zu versehen, welche bis zu den Seiten des Quadrats reicht.

Man kann nämlich den Kreis ohne weiteres auch zur Ablesung der trigonometrischen Funktionen benutzen, wenn man in der Entfernung 1 m vom Drehpunkt ein Senkblei an dem Zeiger anbringt und an den Seiten des Quadrats, welche den Kreis berühren sollen, eine Teilung, welche Tangente und Kotangente abzulesen gestatten. Die Längen von Sinus und Kosinus mißt man vermittelst des Lots mit dem Meterstab ab.

Da eine solche große Tafel umständlich zu handhaben ist, kann man sie dauernd an der Wand des Auditoriums befestigen, als Gegenstück zu dem weiter unten zu besprechenden kreisförmigen Rechenschieber.

Mit der Ausbreitung von Christentum und Mohammedanismus, welche den Sinn von irdischen Dingen ablenkten, trat eine Stockung in der Entwickelung der Wissenschaft ein. Die alte Hochschule, das Museum in Alexandria, wurde zerstört und seine große, eine halbe Million Bände zählende Bibliothek durch Feuer vernichtet. Die ehedem von den Priestern gehüteten Urmaße kamen in den Stürmen der Völkerwanderung abhanden, jeder Staat, ja fast jede Stadt wählte sich ihr be-

sonderes Maß, so daß schließlich selbst die Kaufleute die größten Schwierigkeiten hatten, sich in dem Wirrwarr zurecht zu finden, und außerdem dem Betrug Tür und Tor geöffnet war. Diese Schwierigkeiten, vor allem auch die sehr zeitraubende und mühsame und zudem ganz überflüssige Arbeit der beständigen Umrechnung der Maße auf andere Einheiten führten zu Ende des 18. Jahrhunderts in Frankreich zur Festsetzung eines neuen Längenmaßes unter dem Namen Meter, welches heute von den meisten Kulturstaaten angenommen ist.

Man ließ sich dabei von der Idee leiten, ein Maß zu gewinnen, welches auch im Falle des Verlustes jederzeit mit großer Genauigkeit wieder reproduziert werden könnte, und wählte deshalb einen Bruchteil (den 40 000 000 Teil) des Erdumfanges in der Voraussetzung, daß dieser sich niemals ändere, was allerdings schon wegen der allmählichen Abkühlung der Erde nicht zutrifft.

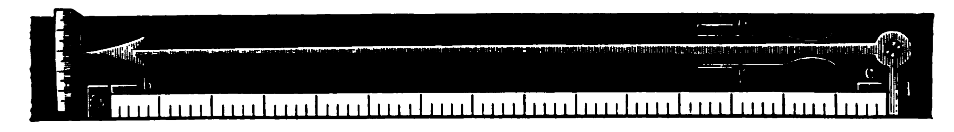
Der erste, aus Platin hergestellte Meterstab, Archiometer genannt, wird in Paris aufbewahrt. Alle anderen im Gebrauch befindlichen Meterstäbe sind mit demselben direkt oder indirekt verglichen.

Spätere Kontrolle ergab, daß das Archiometer nicht genau der Festsetzung entspricht, sondern etwa 0,1 mm zu kurz ist. Um nun nicht nochmals die Längeneinheit ändern zu müssen, betrachtete man deshalb fortan das Archiometer als das wahre Meter. Es ist somit in Wirklichkeit kein absolutes, jederzeit reproduzierbares Maß, sondern wie die früheren ein konventionelles [1]).

4. **Der Fühlhebelkomparator.** Um von einem Normalmaß, welches gewöhnlich in Form eines Stahlstabes von H-förmigem Querschnitt [2]) ausgeführt ist, eine genaue Kopie (Endmaßstab) herzustellen, kann man sich des Fühlhebelkomparators bedienen.

Fig. 2012 zeigt ein Modell desselben, welches man leicht selbst anfertigen kann. Auf einem Brett befinden sich die Klötzchen *a*, *b* und *c*, gegen welche der zur Ver-

Fig. 2012.



fügung stehende Normalmaßstab angelegt wird. Derselbe drückt dabei gegen die Nase *d* eines durch die Federn *e* und *f* gehaltenen langen Zeigers, welche so justiert ist, daß der Zeiger gerade auf die Mitte der Skala weist. Nun wird statt des Normalstabes der zu vergleichende Stab eingelegt. Je nachdem er zu lang oder zu kurz ist, weicht das Zeigerende nach der einen oder anderen Seite von der Mitte

[1]) Neuerdings beabsichtigt man die Umwandlung in ein wirklich absolutes, indem man als eigentliche absolute Längeneinheit die Wellenlänge einer bestimmten Lichtart (z. B. Natriumlicht) festsetzt und die Länge des Archiometers in solchen Einheiten ausdrückt. Geht die Verhältniszahl nicht verloren, so könnte es dann jederzeit wiederhergestellt werden. Vergl. O. Lehmann, Das absolute Maßsystem, Verh. d. naturw. Ver. Karlsruhe 12, 1897 (Ref. Z. 10, 77, 1897). M. Planck (Ann. d. Phys. 1, 120, 1900) empfiehlt ein absolutes Maßsystem aus den Strahlungsgesetzen abzuleiten. — [2]) Nickelstahl-Normalmeter, deren Länge dem Einfluß der Temperatur nicht unterworfen ist, liefert die Société Genevoise, Genf, Chemin Gourgas 5.

ab, und man kann im ersteren Fall durch Befeilen und wiederholtes Probieren den Stab allmählich auf die richtige Länge bringen.

5. Die Teilmaschine. Verschiedene Formen von Teilmaschinen wurden bereits in Bd. I (1) S. 597 u. ff. beschrieben. Sie beruhen sämtlich auf Anwendung der Schraube,

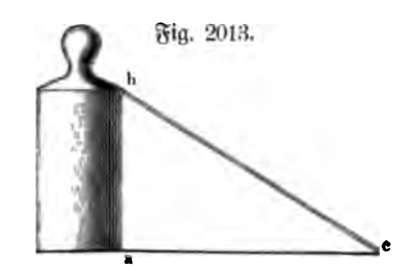


Fig. 2013.

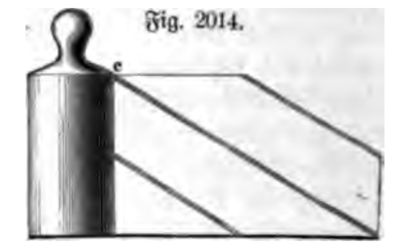


Fig. 2014.



Fig. 2015.



Fig. 2016.

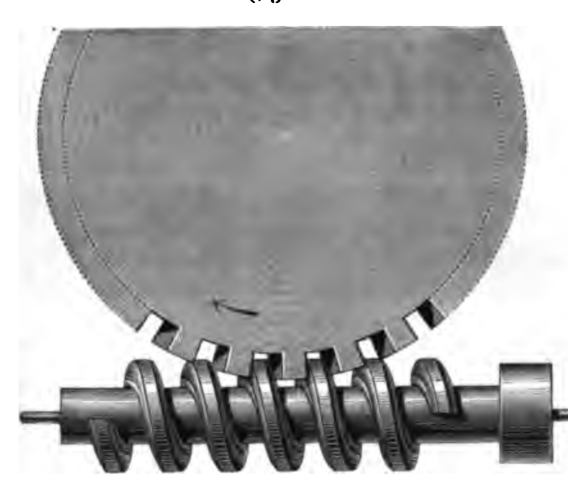


Fig. 2017.

deren Entstehung somit **in erster** Linie zu erklären ist. **Hierzu** dient am besten **ein Cylinder** von Holz von etwa 6 cm **Durchmesser**, an welchen ein **rechtwinkliges** Dreieck von **Papier, wie** *a b c*, Fig. 2013, geleimt **wird**, dessen eine **Kathete** der **Höhe**, dessen andere dem **Umfange** des Cylinders **gleich ist. Die** Hypotenuse sebst wird **mit einem** breiten schwarzen Rande **versehen** und zeichnet beim **Aufwickeln** des **Papiers um den** Cylinder einen Umgang **der** Schraube. (W, 3.)

Man kann so auch die doppelgängige Schraube darstellen, wie in Fig. 2014 [1]).

Bei Verwendung der Schraube zur Herstellung von Teilungen ist nun **die Aufgabe** zu lösen, die Schraube nur ein halb-, ein drittel-, ein viertelmal u. s. w. **umzudrehen.** Sehr einfach und genau wird dies bewirkt, wenn man die Kurbel der **Schraube** mit einer geteilten Kreisscheibe oder Trommel in Verbindung bringt. Als **Modell** kann man eine gewöhnliche hölzerne Schraubzwinge benutzen, an deren Griff **eine**

---

[1]) Modelle von Schrauben mit Mutter nach Fig. 2015 und 2016 liefert Max Kohl in Chemnitz zu 1,75 bezw. 3,50 Mk.

geteilte Kreisscheibe zentrisch befestigt wird. Ein an der Zwinge seitlich angebrachtes Stäbchen dient als Index. Die Herstellung einer Linearteilmaschine hat also die Herstellung einer Kreisteilmaschine zur Voraussetzung.

Auch diese wurde bereits in Bd. I (1), S. 602 besprochen. Um zu demonstrieren, wie mittels einer sogenannten Schraube ohne Ende eine Kreisteilung hergestellt werden kann, könnte man sich eines hölzernen Modells bedienen, wie es Fig. 2017 zeigt.

Das Rad wird mit einer Anzahl von etwa 30 Zähnen versehen, deren Stärke 1 bis $1\frac{1}{2}$ cm beträgt, wobei man die Lücken um $\frac{1}{7}$ stärker nimmt. Die Schraube erhält dann ebenfalls 1 bis $1\frac{1}{2}$ cm Steigung und ebenso tiefe Gänge. Man zeichnet dieselbe auf einen etwa 6 cm Durchmesser haltenden hölzernen, mit Papier überzogenen Cylinder, sägt die Gänge ein und arbeitet sie mit dem Meißel, mit der Raspel und zuletzt mit der Feile aus.

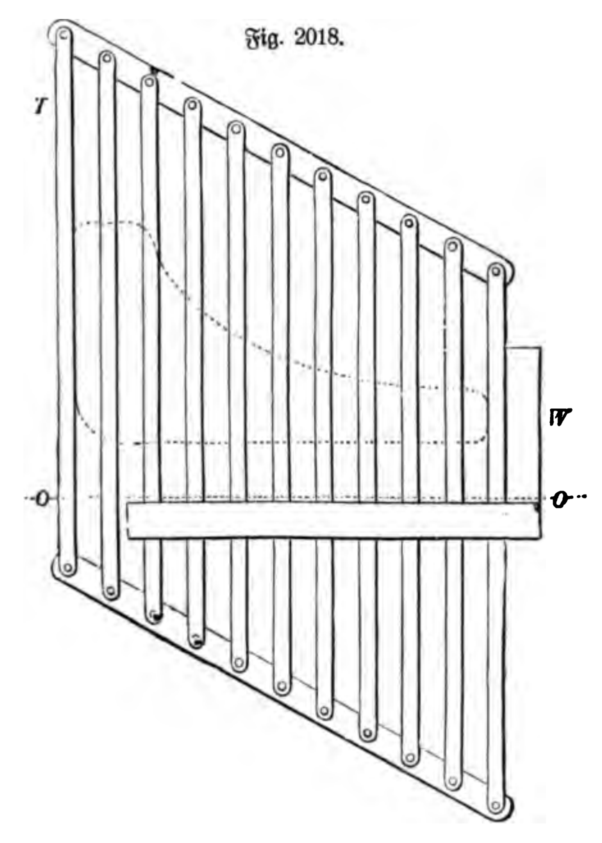


Fig. 2018.

Befestigt man auf dem Rade eine einzuteilende Kreisscheibe und darüber in der Richtung eines Durchmessers ein Lineal, so wird man, wenn jeweils nach Ziehen eines Teilstriches die Schraube einmal umgedreht wird, so viel Teile erhalten, als das Rad Zähne besitzt. Würde man nur einhalbmal umdrehen, so erhielte man die doppelte Zahl Teile u. s. w. Indem man wieder feste Verbindung zwischen Kurbel und Schraube aufhebt und die Bewegung der Kurbel durch zwei Anschläge einschränkt und diese in passenden Abstand bringt, kann man jede gewünschte Teilung des Kreises erhalten. So könnte man sich z. B. einen Winkelmesser herstellen, wie ihn Zeichner gebrauchen.

Einfachere Teilungs-Methoden siehe Bd. I (1), S. 600, Fig. 1964 [1]).

6. Mikrometerschraube, Sphärometer, Dickenmesser. Häufig dient die Teilmaschine direkt als Längenmeßinstrument, insofern man aus der Anzahl Umdrehungen der Schraube, bis der Stichel von einem Punkte bis zu einem zweiten gewandert ist, den Abstand dieser Punkte erfahren kann. Zweckmäßiger wird der

[1]) Dreyer, Rosenkranz u. Droop, Hannover, liefern ein Teillineal mit Winkelschiene aus Stahl nach Fig. 2018.

Stichel ganz fortgelassen und auf dem Schlitten nur ein Index angebracht (Mikrometerschraube, Schlittenverschiebung).

Bringt man bei dem oben besprochenen rohen Modell auf dem Indexstäbchen noch eine der Ganghöhe der Schraube entsprechende Teilung an, so hat man ein Modell des Dickenmessers (Fig. 2019, E, 13,5). In feinerer Ausführung wird derselbe mit einem Fühlhebel kombiniert [1]). Das gebräuchliche Laboratoriumsinstrument zu Dickenmessungen ist das Sphärometer (Fig. 2021, K, 62).


Fig. 2019.

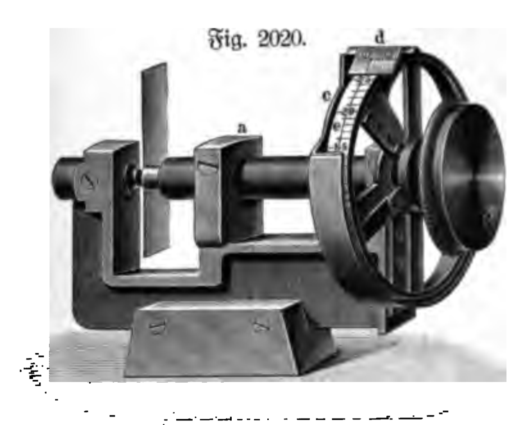


Fig. 2020.

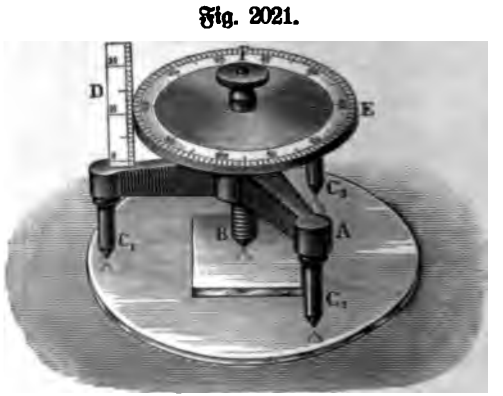


Fig. 2021.

7. **Maßstäbe, Schublehre, Streichmaß.** W. Volkmann (Ann. d. Phys. 11, 654, 1903) empfiehlt die Holzmaßstäbe der Firma C. Bube, Hannover-Bothfeld, welche mit einem künstlichen elfenbeinartigen Teilungsgrund versehen sind, der sehr zarte Teilung ermöglicht.

Um Teilungen weithin sichtbar zu machen, kann man die Intervalle zwischen den Teilstrichen abwechselnd rot und weiß oder schwarz und weiß bemalen, wie es für geodätische Maßstäbe seit langer Zeit üblich ist. (Fig. 2022, K.) Immerhin

Fig. 2022.

scheint mir dies ein Auskunftsmittel, welches die Übersicht stört und tunlichst vermieden werden sollte. Ich ziehe deshalb vor, Teilungen mit dicken Strichen zu verwenden, auch wenn die Genauigkeit darunter leiden sollte, was nichts schadet, da der Unterricht nicht bezweckt, Präzisionsmessungen auszuführen, sondern Begriffe klar zu stellen.

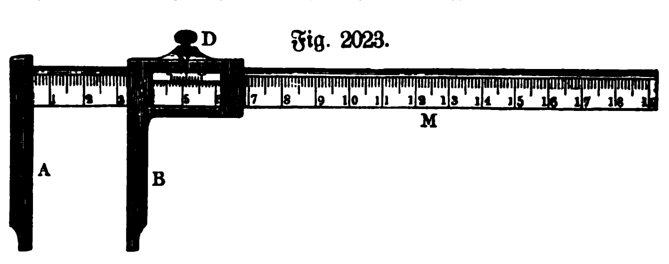
---

[1]) Ein Dickenmesser in Dosenform zur Messung der Dicke von Deckgläsern u. s. w., welcher direkt hundertel Millimeter ablesen läßt, ist zu beziehen von C. Zeiß in Jena zu 30 Mk. Vergl. auch Bd. I (1), S. 382, Fig. 1001 u. 1002. Fig. 2020 zeigt ein Pachymeter zum genauen Messen von Blech-, Papier- und Drahtstärken (86, 52).

Um Höhenunterschiede oder Dicken zu messen, wird der Maßstab mit einem verschiebbaren seitlichen Arm versehen. In solcher Weise sind das stehende Streichmaß (Fig. 1024 bis 1028, Bd. I (1), S. 384), sowie die Schublehre (Fig. 2023, E, 6,50) eingerichtet, von welchen ersteres (in feinerer Ausführung Kathetometer genannt) zu Höhen-, letztere zu Dickenmessungen dient.

Auch zu Demonstrationszwecken kann die Schublehre öfters Verwendung finden. Ich habe mir zu diesem Zweck aus Holz und Blech eine solche hergestellt (Fig. 2024), welche Längen bis zu 1 m zu messen gestattet und etwa 0,5 m lange Ansätze besitzt. Im Handel sind Schublehren von ähnlicher Größe, zum Messen der Dicke von Baumstämmen bestimmt, zu erhalten[1]). Kleine Schublehren (Kaliber) kann man in jeder Eisenhandlung kaufen. Die feineren sind mit Nonius versehen.

Fig. 2023.



In manchen Fällen bequemer als die Schublehre ist die Richtplatte mit aufgesetztem stehenden Streichmaß (vergl. Bd. I (1), S. 384, Fig. 1028). Zu physikalischen Zwecken findet sie seltener Verwendung. Eine andere Art Dickenmesser gleicht dem Reduktionszirkel. Die zwischen den kurzen Schenkeln gemessene Dicke erscheint an dem Maßstab zwischen den langen Schenkeln vergrößert. Bei dem sogenannten Saitenmesser sind zwei Lineale sehr wenig gegeneinander geneigt. Je dünner der Körper, um so weiter läßt er sich in den Winkel hineinschieben.

Fig. 2024.

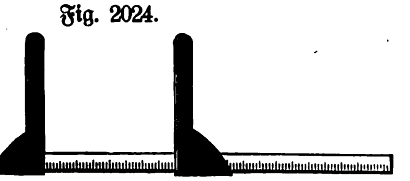
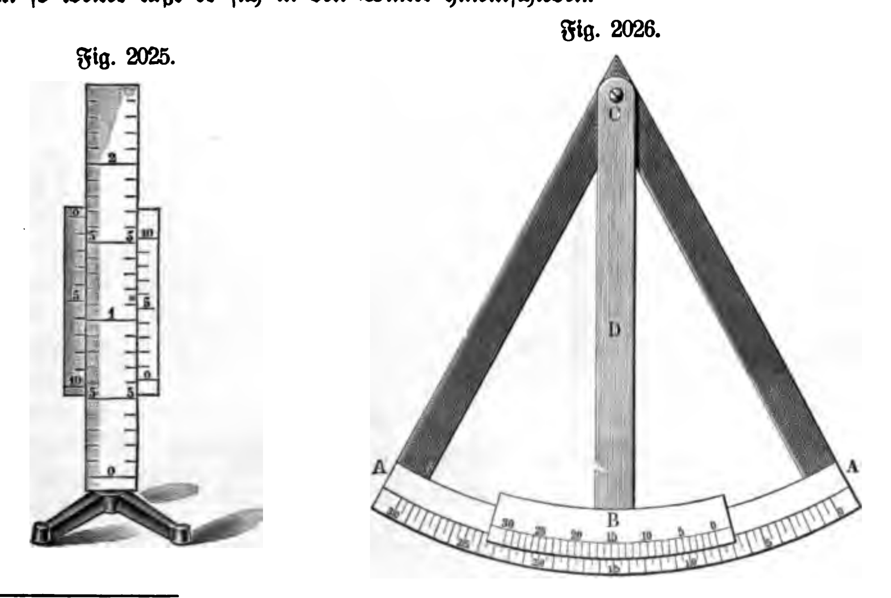


Fig. 2025. Fig. 2026.



[1]) Solche Gabelmaße für Durchmesser von 300 bis 1000 mm liefert Sonnenthal jun., Berlin C., Neue Promenade 6, zu 7,50 bis 12,50 Mk.

8. **Der Nonius** (Vernier). Zur Ablesung der Bruchteile wird sowohl bei linearen wie bei Winkelteilungen sehr häufig der Nonius benutzt, ein kleiner Maßstab, der sich an dem Hauptmaßstab verschieben läßt und 10 Teile besitzt, die entweder = 9 (vorlaufender Nonius) oder = 11 Teilen (rücklaufender Nonius) des Hauptmaßstabes sind. Setzt man denselben irgendwo an der Teilung an, beobachtet, wo Teilstriche übereinstimmen, und schreitet von hier aus nach links oder rechts weiter, so ist die Differenz der nächsten Teilstriche 0,1, die der folgenden 0,2 u. s. w., so daß man leicht erkennen kann, wie groß sie beim Nullstrich des Nonius ist, der als Index für den Hauptmaßstab dient (Fig. 2025, Lb, u. 2026, K, 22). Projektionsmodelle (Fig. 2027 bis 2029) nach Bernoulli (Z. 16, 345, 1903), welche ermöglichen, den Gebrauch einer größeren Zuhörerzahl zu erläutern, liefern Leybolds Nachf., Köln.

Fig. 2027.



Fig. 2028.

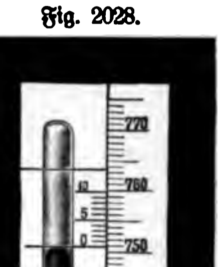
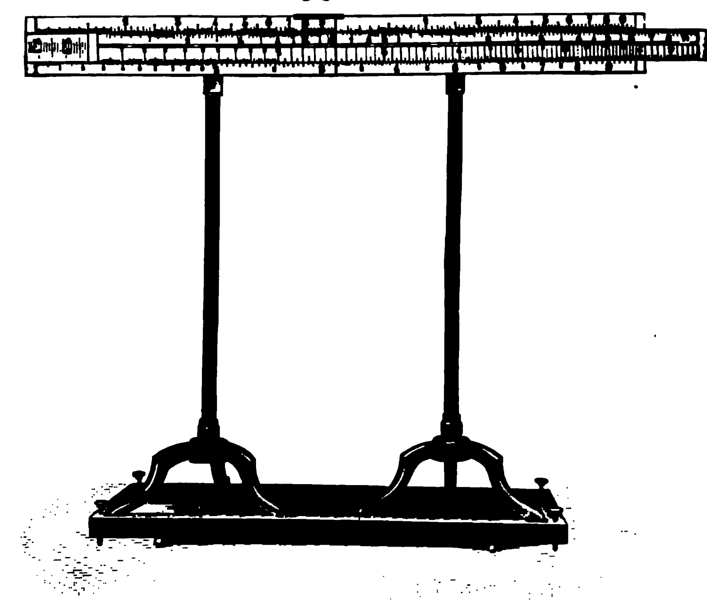


Fig. 2029.



Fig. 2030.



9. **Der Rechenschieber.** Obschon es nach der Eroberung Alexandrias und Zerstörung des Museums den Anschein hatte, als ob damit die alte Wissenschaft

für alle Zeiten vernichtet sei, so hatten sich doch manche Reste erhalten, welche von den Arabern gehütet und weiterentwickelt wurden. Diese gründeten sogar selbst Hochschulen (Medresen) und erwarben sich wesentliche Verdienste durch Einführung der indischen Ziffern, welche schließlich auch an den Dom- und Klosterschulen (durch Papst Gerbert) Eingang fanden und später auch in weitere Volkskreise (durch Adam Riese). Immerhin wurden eingehende Berechnungen erst möglich nach Erfindung der Logarithmen durch Jobst Bürgi, Napier (1614), Briggs u. a., welche schließlich zur Konstruktion des Rechenschiebers führten, des Instruments, welches zur raschen Ausführung physikalischer Rechnungen unentbehrlich ist. Theorie und Gebrauch des Rechenschiebers sind bereits in Bd. I (1), S. 348 besprochen worden. Es ist insbesondere darauf hinzuweisen, mit wie großer Leichtigkeit man mittels des Rechenschiebers Umfang oder Inhalt einer Kreisfläche findet, oder Mantelfläche oder Inhalt eines Cylinders, Aufgaben, die außerordentlich häufig zu lösen sind.

Zu Demonstrationszwecken stellt man sich am besten selbst einen Rechenschieber her, was mit Maßstab und Logarithmentafel leicht möglich ist. Ich verwende bei meinen Vorlesungen einen solchen selbst verfertigten Schieber von 2 m Länge, welcher auf eisernen Stativen befestigt ist, die selbst wieder, wie aus Fig. 2030 zu ersehen, auf einen mit Rollen versehenen Rahmen aufgeschraubt sind.

Auch kreisförmige Rechenschieber kann man sich unschwer selbst herstellen. In großem Maßstabe auf einer Tafel von 2 m Durchmesser ausgeführt und fest an der Wand des Auditoriums befestigt, würde eine solche Rechenscheibe das Gegenstück der oben S. 640 erwähnten Kreisteilung zur Messung von Winkeln und trigonometrischen Funktionen bilden [1]).

10. Zeiteinheit, Uhren. Die besprochenen Raummaße reichen wohl aus zur genauen Messung und exakten Beschreibung der Form und Lage von Körpern. Zur Beschreibung von Erscheinungen ist aber noch ein anderes Maß erforderlich, das Maß der Zeit, in welcher sich die Erscheinung vollzieht. Als Beispiel führe ich die Bewegung eines Wagens auf horizontalen Schienen von 4 m Länge vor.

Fig. 2031.

Man könnte zunächst daran denken, als Zeiteinheit die Zeit zwischen Auf- und Untergang der Sonne zu wählen, wie es auch in sehr alten Zeiten geschehen ist. An dem Apparat von Mang läßt sich indes leicht erkennen, daß diese Zeit starkem Wechsel unterworfen sein muß, denn die Bahn der Sonne über dem Horizont ist im Sommer eine sehr viel längere als im Winter. Man könnte ferner als Zeiteinheit wählen die Zeit von einer Kulmination der Sonne bis zur nächsten (Gnomon, Scaphium), indes wäre dabei zunächst zu beweisen, daß die Sonne wirklich zu jedem Umlauf dieselbe Zeit gebraucht. Frei von diesen Bedenken ist die Bestimmung der Zeit mittels der Sanduhr, welche schon in den ältesten Zeiten gebräuchlich war und auch heute noch als sogenannter Eierkocher (Fig. 2031) Verwendung findet.

Als Zeiteinheit dient dabei die Zeit der Entleerung eines Gefäßes. Man kann als sicher annehmen, daß unter gleichen Umständen, d. h. bei gleicher Form und Füllung des Gefäßes die Zeit der Entleerung immer dieselbe ist. Noch sicherer,

[1]) Eventuell kann hier auch die graphische Darstellung von Beobachtungen, die graphische Ausgleichung von Fehlern u. s. w. besprochen werden.

der gleichmäßigen Beschaffenheit des Wassers wegen, trifft dies zu für die Klepsydra (Wasseruhr), welche ebenfalls schon seit den ältesten Zeiten in Gebrauch war. Diese bietet auch ein Mittel, die Zeiteinheit auf die Längeneinheit zu reduzieren, insofern man als Zeiteinheit festsetzen kann die Entleerungszeit eines würfelförmigen Wasserbehälters, dessen Seitenlänge gleich der Längeneinheit ist und dessen Bodenfläche mit einer unveränderlichen (etwa im Edelstein gebohrten) Öffnung von bestimmter Weite versehen ist. War bei einer solchen Uhr die Zeiteinheit „abgelaufen", so wurde dies durch Anschlagen einer Glocke (Metallplatte) verkündet, sodann das Gefäß aufs neue gefüllt, wieder die Entleerung abgewartet und so fort.

Eine sehr einfache Uhr kann aus einer gewöhnlichen Stearinkerze erhalten werden, wenn man sie entsprechend dem Abbrand in je einer Stunde mit einer Skala versieht. Werden an die Teilstriche Metallkügelchen angeschmolzen, welche beim Abbrennen der Kerze auf eine Glocke fallen, so schlägt die Uhr wie eine andere. Ebenso kann sie als Weckeruhr eingerichtet werden.

Bei den Chinesen waren neben Wasseruhren Glimmstengeluhren vielfach verbreitet, bei welchen die Kerze durch ein glimmendes Stäbchen (ähnlich der Sprengkohle) ersetzt ist.

In Frankreich sind Kerzenuhren als Nachtuhren noch heute im Gebrauch. Durch den Druck einer Feder wird die Kerze wie bei einer Wagenlaterne nach oben gedrückt, so daß die Flamme stets in gleicher Höhe hinter einem Zifferblatt auf Milchglas brennt und dieses erleuchtet. Durch eine Schnur wird die Bewegung der Kerze auf eine Rolle übertragen, welche einen Zeiger auf dem Zifferblatt dreht[1]).

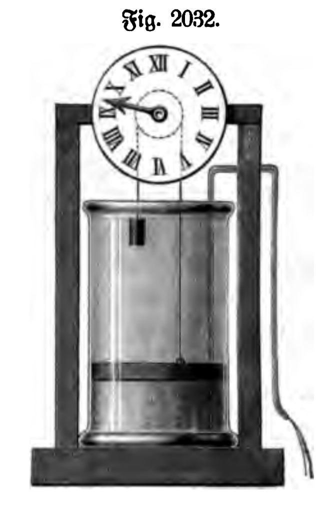
Eine bequemere Form der Wasseruhr wird gewonnen, wenn man das Gefäß sich nicht entleeren läßt, sondern beständig Wasser zuleitet und durch einen Überfall, über welchen überschüssiges Wasser abfließen kann, dafür sorgt, daß das Niveau stets in gleicher Höhe bleibt; dann muß selbstverständlich im gleichen Zeitraum gleich viel ausfließen. Fließt also das Wasser etwa in ein cylindrisches Glasgefäß, so wird in diesem der Wasserspiegel in jeder Zeiteinheit ungleich viel steigen und man wird leicht im stande sein, indem man die Niveauänderung von einer Kulmination der Sonne bis zur nächsten feststellt und dieselbe etwa in 100 gleiche Teile teilt, die Zeit in Hundertstel eines Tages zu bestimmen. Da im Altertum die Herstellung größerer Glasgefäße nicht möglich war, so benutzte man Metallgefäße und machte den Wasserstand sichtbar durch einen eingesetzten Schwimmer, z. B. ein Brett mit einem aus dem Gefäß herausragenden Stiel, auf welchen die Skala aufgetragen war. Bei den Römern waren Uhren gebräuchlich, an welchen statt dieses Stieles eine um eine Rolle geschlungene und durch ein kleines Gewichtchen beschwerte Schnur angebracht war. Die Achse dieser Rolle trug einen Zeiger, welcher sich auf einem Zifferblatt bewegte. Auch durch Zahnstange und Trieb wurde die Zeigerbewegung veranlaßt. Bei einfacheren Wasseruhren beschränkte man sich auf Beobachtung des Ausflusses von Wasser aus einem trichterartigen Gefäß. Obschon mit sinkendem Wasserspiegel die Ausflußgeschwindigkeit abnimmt, behielten doch die Teilstriche, welche den den einzelnen Stunden entsprechenden Wasserstand angaben, infolge der Verengerung des Gefäßes gegen unten gleichen Abstand.

---

[1]) Siehe Prometheus 6, 287, 1895.

Bei Herons Wasseruhr war das Gefäß cylindrisch, und die Senkung des Wasserspiegels wurde mittels Schwimmer und Schnur durch Bewegung eines Zeigers sichtbar gemacht. Der Ausfluß des Wassers erfolgte durch einen an dem Schwimmer befestigten Heber, wobei natürlich die Ausflußgeschwindigkeit konstant blieb. Fig. 2032 zeigt ein Modell einer solchen Uhr.

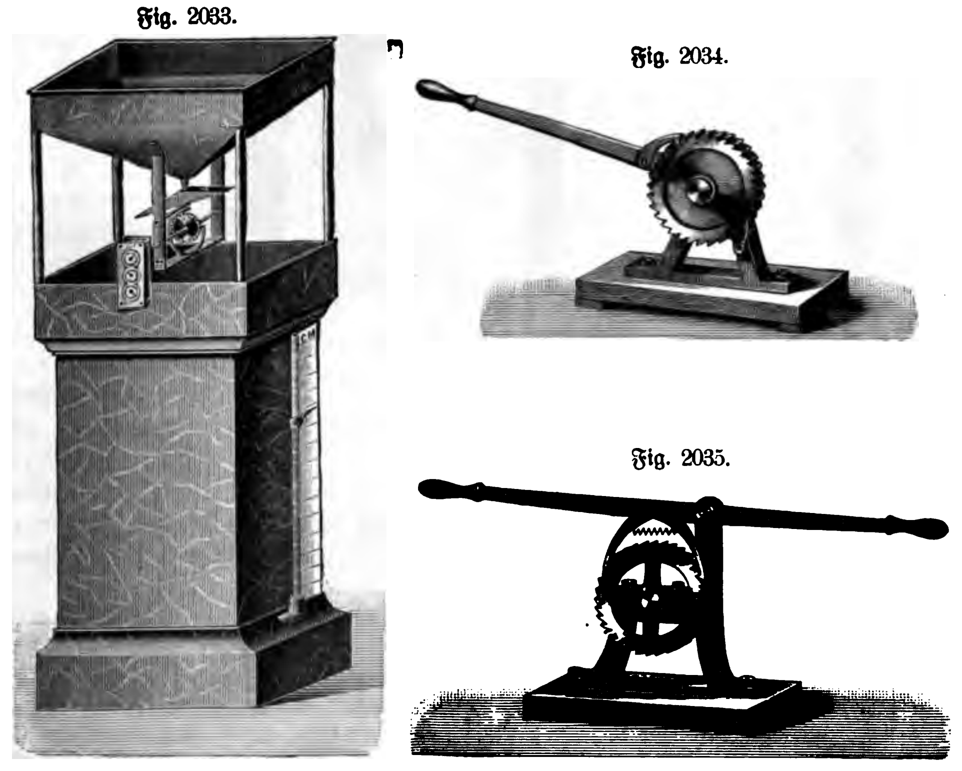
Fig. 2032.



Bei der Walgeruhr, deren Konstruktion auf die des bekannten Quecksilbermännchens hinauskommt, war das Wassergefäß an Schnüren aufgehängt, welche um walzenförmige Verlängerungen gewickelt waren. Es sank langsam an einer Stundenteilung herunter, während die Schnüre sich abwickelten und der Wasserinhalt von einer Kammer des Innern durch eine feine Öffnung in die nächste überströmte. (Abbildungen findet man in dem „Buch der Erfindungen", Leipzig 1900, Spamer, 6, 584 u. ff.)

Eine später erfundene Konstruktion beruht darauf, daß das Wasser in ein zwei Fächer enthaltendes um

Fig. 2033. Fig. 2034. Fig. 2035.



eine Achse drehbares Gefäß (schwingender Nachen) einläuft, welches jeweils umkippt, nachdem sich ein Fach gefüllt hat, dasselbe dadurch entleert und das zweite unter die Ausflußöffnung bringt. Es ist leicht, die hin und her gehende Bewegung dieses Nachens ähnlich wie die schwingende Bewegung eines Pendels auf ein Steigrad zu übertragen, dessen Achse mit einem auf einem Zifferblatt

sich bewegenden Zeiger in Verbindung steht, oder ein Räderwerk betreibt, welches die Bewegung auf einen solchen Zeiger überträgt. Fig. 2033 zeigt einen nach diesem Prinzip eingerichteten Apparat, welcher zum Messen der Regenmenge dient (E, 115). Die Fig. 2034 (E, 54) und 2035 (E, 70) stellen Modelle des Sperrrades dar.

Für sehr feine Messungen ist freilich das Wasser infolge der Verdunstung, Adhäsion u. s. w. nicht gerade die geeignetste Substanz. In späteren Zeiten, die der Erfindung der genaueren Pendeluhren vorangingen, wurde deshalb das Wasser durch Quecksilber ersetzt (Quecksilberuhren [1]).

Die Räderuhren mit Wag und Pendel, sowie die elektrischen Uhren werden später unter Dynamik bezw. Elektromagnetismus besprochen [2]).

Mittels solcher Quecksilberuhren, wie sie lange Zeit von den Astronomen gebraucht wurden, war es möglich festzustellen, daß die Zeit von einer Kulmination der Sonne bis zur nächsten keineswegs immer dieselbe ist, somit der sogenannte Sonnentag eine unbrauchbare Zeiteinheit wäre; es ergab sich dagegen, daß sich der

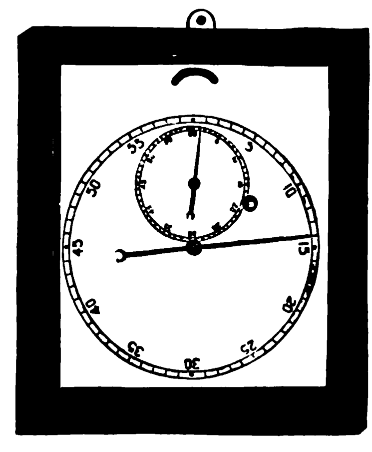

Fig. 2036.


Fig. 2037.

ganze Sternenhimmel durchaus gleichmäßig um die Weltachse dreht. Man wählte deshalb als Zeiteinheit die Zeit von einer Kulmination eines Fixsternes bis zur nächsten, den sogenannten „Sterntag" [3]).

Da sich nun aber das gewöhnliche Leben nach dem Lauf der Sonne richtet, so wurde neben der sogenannten Sternzeit noch die mittlere Sonnenzeit eingeführt, d. h. ein Tag, dessen Länge das Mittel der wahren Sonnentageslängen ist. Dieser Tag ist nicht unerheblich länger als der Sterntag.

Die Sonne scheint nämlich nicht wie die Sterne am Himmelsgewölbe befestigt

[1]) Über alte Uhrkonstruktionen siehe Buch der Erfindungen, Leipzig 1900, Spamer, 6, 584 u. ff.; ferner Das neue Universum, Stuttgart, Union, 19, 336 u. 16, 63. — [2]) Zu Demonstrationszwecken empfehlen sich einfache Sekundenuhren oder Sekundenschläger, wie solche in den Fig. 2036, Lb, 55 und 2037, Lb, 12 dargestellt sind (vgl. auch S. 147). — [3]) Da sich infolge von Ebbe und Flut, Kontraktion infolge von Abkühlung die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde im Laufe der Zeit ändert, ist auch der Sterntag keine absolut unveränderliche Einheit. Man hat deshalb ähnlich wie beim Meter vorgeschlagen, ihn durch eine wirklich absolute Einheit auszudrücken, z. B. die Schwingungsdauer des Natriumlichts oder die Zeit, in welcher ein Grammstück einem zweiten im Abstand 1 cm die Geschwindigkeit 1 durch die Wirkung der Gravitationskraft erteilt.

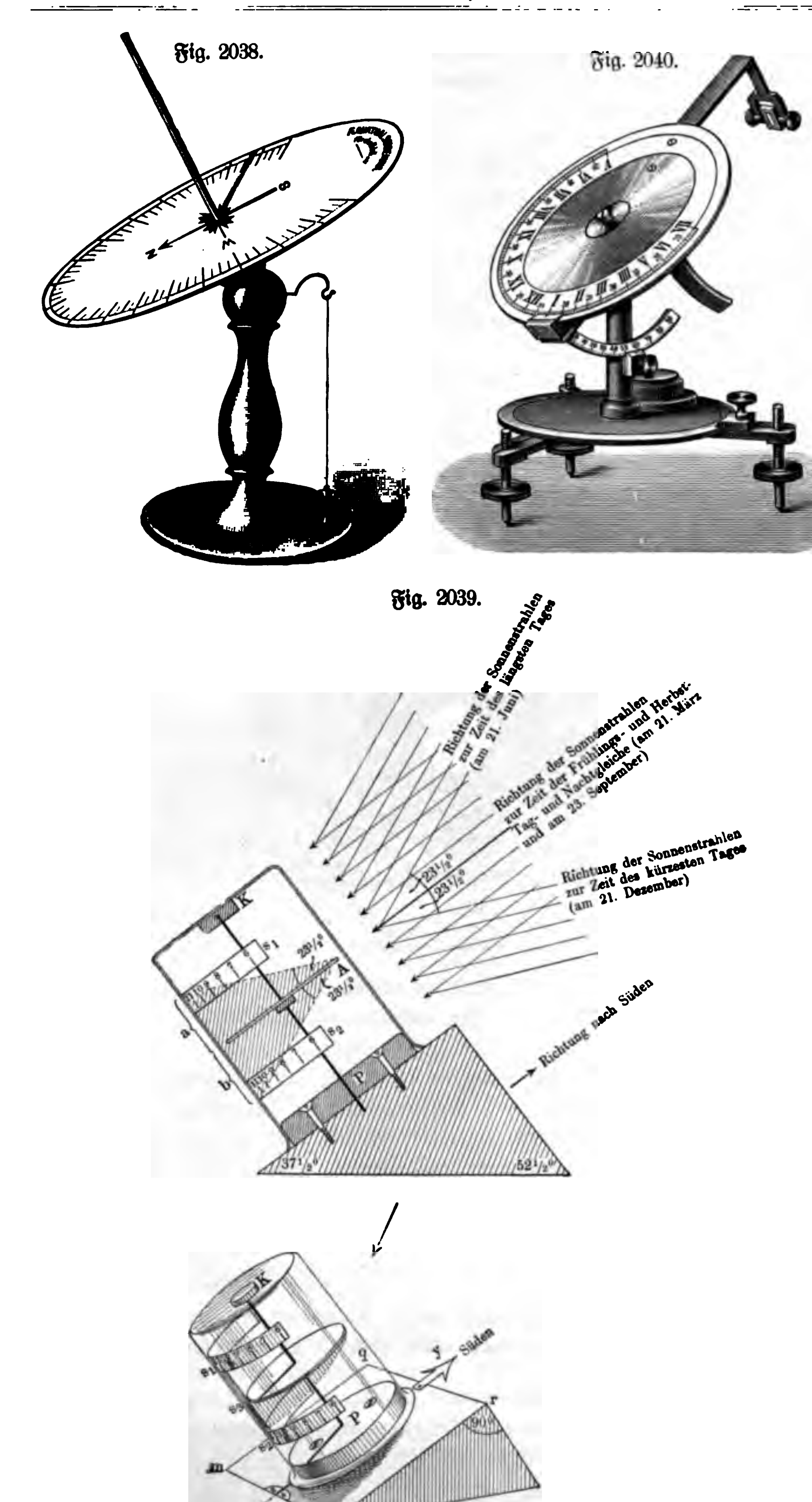


Fig. 2038.

Fig. 2040.

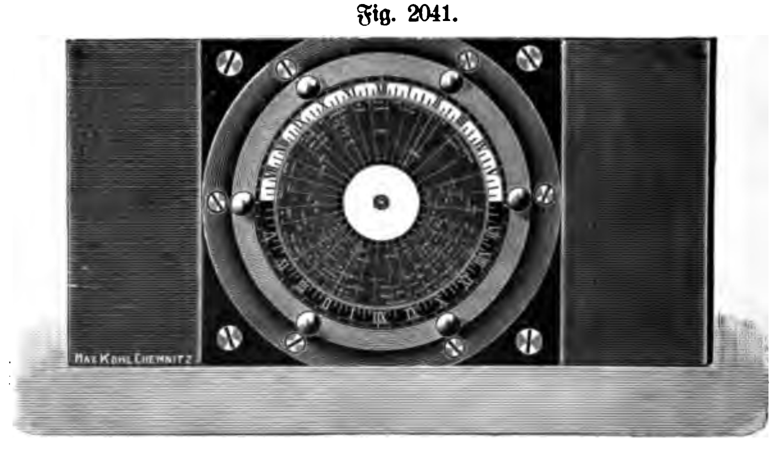
Fig. 2039.

zu sein, denn nach Verlauf eines Sterntages hat sie ihre frühere Stellung am Himmel noch nicht wieder erreicht, sie kommt vielmehr um ungefähr vier Minuten zu spät, d. h. der Sonnentag ist um ungefähr vier Minuten länger als der Sterntag. Je nach der Jahreszeit ist die Differenz zwischen beiden Tagen verschieden, im Mittel beträgt sie 3 Minuten 55,9 Sekunden.

Die Zeit Sterntag + 3 Minuten 55,9 Sekunden nennt man „mittleren Sonnentag", und aus diesem leitet sich die als gewöhnliche Zeiteinheit benutzte „mittlere Sonnenzeit-Sekunde" ab, welche als der 86400ste Teil des mittleren Sonnentages bezeichnet werden kann. Die Differenz zwischen der wahren und mittleren Sonnenzeit heißt Zeitgleichung, wahrer Mittag + Zeitgleichung gibt den bürgerlichen Mittag [1]).

Auf Grund dieser Regel kann man jederzeit leicht aus der beobachteten Sonnenzeit die bürgerliche Zeit ableiten. Um die Unterabteilungen des Tages zu erhalten, denke man sich einen in Grade geteilten Kreis auf ein ebenes Brett gezeichnet und dieses in der Ebene aufgestellt, in welcher sich die Sonne am Himmelsgewölbe bewegt, d. h. so, daß die Verlängerung seiner Normalen durch den Nordpol des Himmelsgewölbes (Polarstern) geht. Alsdann werde ein Stäbchen in das Zentrum

Fig. 2041.



des Kreises in der Richtung dieser Normalen eingesteckt. Man sieht dann während der Bewegung der Sonne natürlich dessen Schatten gleichmäßig von Teilstrich zu Teilstrich fortwandern.

Da sich der Kreis leicht und genau in 24 gleiche Teile einteilen läßt, wurde der 24ste Teil des ganzen Tages, d. h. die Zeit, die der Schatten einer solchen sogenannten Sonnenuhr gebrauchten, um einen Winkel von 15° zurückzulegen, als Stunde (hora) bezeichnet, ferner der 60ste Teil einer solchen, d. h. die Zeit zum Durchlaufen eines viertel Grades als Minute (hora minuta prima), der 60ste Teil einer Minute als Sekunde (hora minuta secunda) und der 60ste Teil einer Sekunde als Tertie (hora minuta tertia).

Zu berücksichtigen ist ferner noch, daß die Zeit nicht an allen Orten der Erde dieselbe ist, daß vielmehr zur Mittagszeit unsere Antipoden Mitternacht haben.

Aus der wahren Sonnenzeit erhält man deshalb die gewöhnliche bürgerliche

[1]) Eine Tabelle der Zeitgleichung findet man in F. Kohlrauschs Lehrbuch der praktischen Physik, sowie in Schoedler-Schwalbe, Buch der Natur 1904, III (1), 139.

mitteleuropäische Zeit, indem man zunächst die Zeitgleichung addiert und sodann noch (15 — l) × 4 Minuten (l = geogr. Länge.)

Eine kleine Sonnenuhr nach Fig. 2040 (Preis 60 Frcs.) liefern, nach Angaben von H. Wild, Hermann u. Pfister in Bern [1]). Dieselbe ruht auf einem Dreifuß mit Stellschrauben und Dosenlibelle, so daß sie leicht an jedem beliebigen Orte aufgestellt werden kann. Man bestimmt mit der Bussole die betreffende Mittagslinie, errichtet auf derselben eine Senkrechte — am besten auf Holz oder Stein mit Bleistift — und bringt die auf 0° des Höhengradbogens gestellte Stundenscheibe mit Hilfe der Horizontalbewegung genau in Übereinstimmung mit dieser Senkrechten. Hierauf wird der Stundenkreis auf die Polhöhe (Breite) des betreffenden Ortes gestellt und die Zeit unter Berücksichtigung der jeweiligen Zeitgleichung abgelesen [2]).

11. Geschwindigkeit. Nachdem nunmehr eine Maßeinheit für die Zeit gewonnen ist, ist es möglich, die Winkelgeschwindigkeit eines umlaufenden Schwungrades zu bestimmen, wobei der Gebrauch des Tourenzählers (s. S. 317) erläutert werden kann. Ferner kann man die lineare Geschwindigkeit des oben erwähnten Wagens auf horizontalen Schienen oder einer durch ein Uhrwerk getriebenen laufenden Puppe (Automat) ermitteln. Als Uhr benutze ich dabei die große elektrische Sekundenuhr im Auditorium (s. S. 147) oder ein Metronom (vergl. S. 650, Anm. 2). Es wird namentlich zu kontrollieren sein, ob die Bewegung wirklich eine gleichmäßige, d. h. der in jeder Sekunde zurückgelegte Weg derselbe ist. Man kann ferner den Gebrauch des Meßrades zur Ausmessung krummliniger Bahnen, d. h. einer mit Tourenzähler versehenen Scheibe, 0,1 m Umfang, sowie des Wegmessers [3]), eines kleinen Wagens mit einem an einen Tourenzähler angeschlossenen Rad von 1 m Umfang besprechen. Dabei kann darauf hingewiesen werden, wie durch das Räderwerk des Tourenzählers eventuell auch durch eine Schraube ohne Ende und flaschenzugartige und andere kinematische Vorrichtungen große Geschwindigkeiten in kleine umgesetzt werden können [4]).

12. Räderwerke [5]). Ein Apparat, welcher mehrere verschiedene Zahnräder und deren Eingreifen zeigt, ist von Emsmann (1885) beschrieben und, als durch 40 jährigen Gebrauch erprobt, empfohlen worden (Fig. 2042).

Ich gebe die Beschreibung desselben hier wörtlich wieder. „Der Apparat besteht aus einem etwa 15 cm hohen Gehäuse aus starkem Messingblech. Die Grundfläche ist rechteckig mit 11 und 18 cm langen Seiten. Nur zwei Seitenflächen sind an den längeren Seiten vorhanden, welche sich nach oben verjüngen und durchbrochen

---

[1]) Eine einfache Sonnenuhr (Fig. 2038) liefern Leppin u. Masche, Berlin SO., Engelufer 17, zu 36 Mk. Bezüglich der in Fig. 2039 dargestellten Sonnenuhr siehe Donath, Physikal. Spielbuch, Braunschweig 1903, S. 223. — [2]) Fig. 2041 zeigt eine Weltuhr zur Erklärung der verschiedenen Ortszeiten an verschiedenen Teilen der Erde mit Angabe der hauptsächlichsten Städte (K, 20 Mk.). — [3]) Hierher gehören auch die auf dem Trägheitsprinzip beruhenden Schrittmesser. P. A. Joanot, Uhrenfabrik, Genf, rue des alpes 5, liefert Hippohodometer (Pferdeschrittmesser). — [4]) Eine Zusammenstellung der verschiedensten Geschwindigkeiten findet man in dem Buch J. Olshausen, Geschwindigkeiten in der organischen und anorganischen Welt. Hamburg 1903, Boysen u. Maasch. — [5]) Lauf- und Triebwerke verschiedener Art liefert Alfred Lamy, Furtwangen.

sind, um das Innere bequem überblicken zu können. Etwas unterhalb der Mitte der Seitenwände hat an nicht ausgeschnittenen Stellen eine Achse ihr Lager, welche außen an beiden Seiten hervorragt und zur Aufnahme je einer Kurbel kantig endet. Diese Achse trägt innen nahe an der einen Wand ein Sternrad von 5 cm Durchmesser mit 60 Zähnen; in der Nähe der anderen Wand befindet sich an derselben Achse ein konisches Rad von $2^{2}/_{3}$ cm Durchmesser mit 20 unter 45° zur Fläche geneigten Zähnen. Das Sternrad greift oberhalb in einen Kumpf mit 12 Rippen an einer Achse, welche ihre Lager ebenfalls an einer nicht ausgeschnittenen Stelle der Seitenwände hat und außer dem Kumpfe noch ein Kammrad mit 48 Zähnen trägt. Dies Kammrad steht der Seite des Kumpfes so nahe, daß seine Zähne in einen Drilling mit acht Triebstöcken, dessen Achse gerade durch die Mitte der Deckplatte geht, eingreifen. Die Figur zeigt, wie das untere Ende der Drillingachse ein festes Lager erhält, und wegen der noch übrigen drei konischen Räder mit 30, 18 und 24 Zähnen dürfte ebenfalls ein Hinweis auf die Figur genügen. Daß auch an die Achse des 24 zähnigen konischen Rades sich eine Kurbel, von denen jedoch überhaupt nur zwei vorhanden zu sein brauchen, ansetzen läßt, ist auch ersichtlich und ebenso die Verdickung mit einer Klemmschraube an der Achse des Drillings zum Aufstecken von Schwungapparaten, welche mit einer geschlitzten Hülse versehen sind. Der ganze Apparat ist auf einem starken Holzkasten befestigt, in welchem sich ein herausziehbarer Schubkasten von etwa 12 cm Höhe befindet, der aber eingesetzt gegen das Herausfallen gesichert sein muß. In diesem Kasten werden die Kurbeln und andere zum Experimentieren nötige Vorrichtungen aufbewahrt.

Fig. 2042.

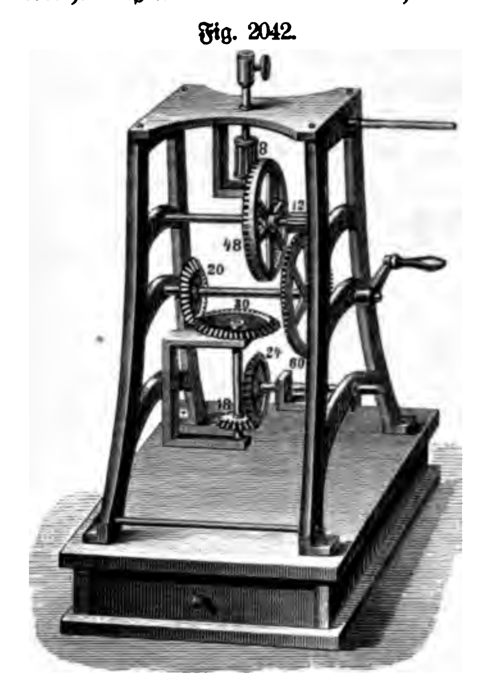
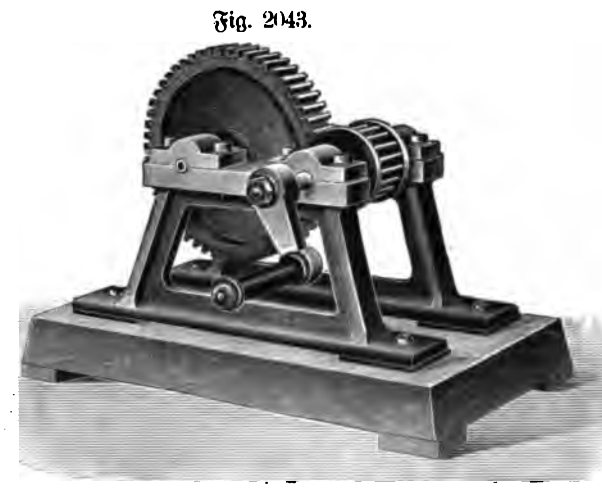


Fig. 2043.



Der Apparat zeigt fünf verschiedene Radsorten und ihr Eingreifen ineinander. Steht die Sternradfläche vertikal und wird die Kurbel an der Achse desselben gedreht, so bewegen sich zunächst der Kumpf und das Kammrad ebenfalls vertikal,

und zwar diese beiden bei einer Umdrehung der Kurbel fünfmal; durch das Eingreifen des Kammrades in den Drilling wird letzterer und mithin auch seine Achse und der Zapfen für die Aufsätze in eine horizontale Drehung versetzt, und zwar bei einer Umdrehung des Kammrades sechsmal, so daß der auf den Zapfen auf-

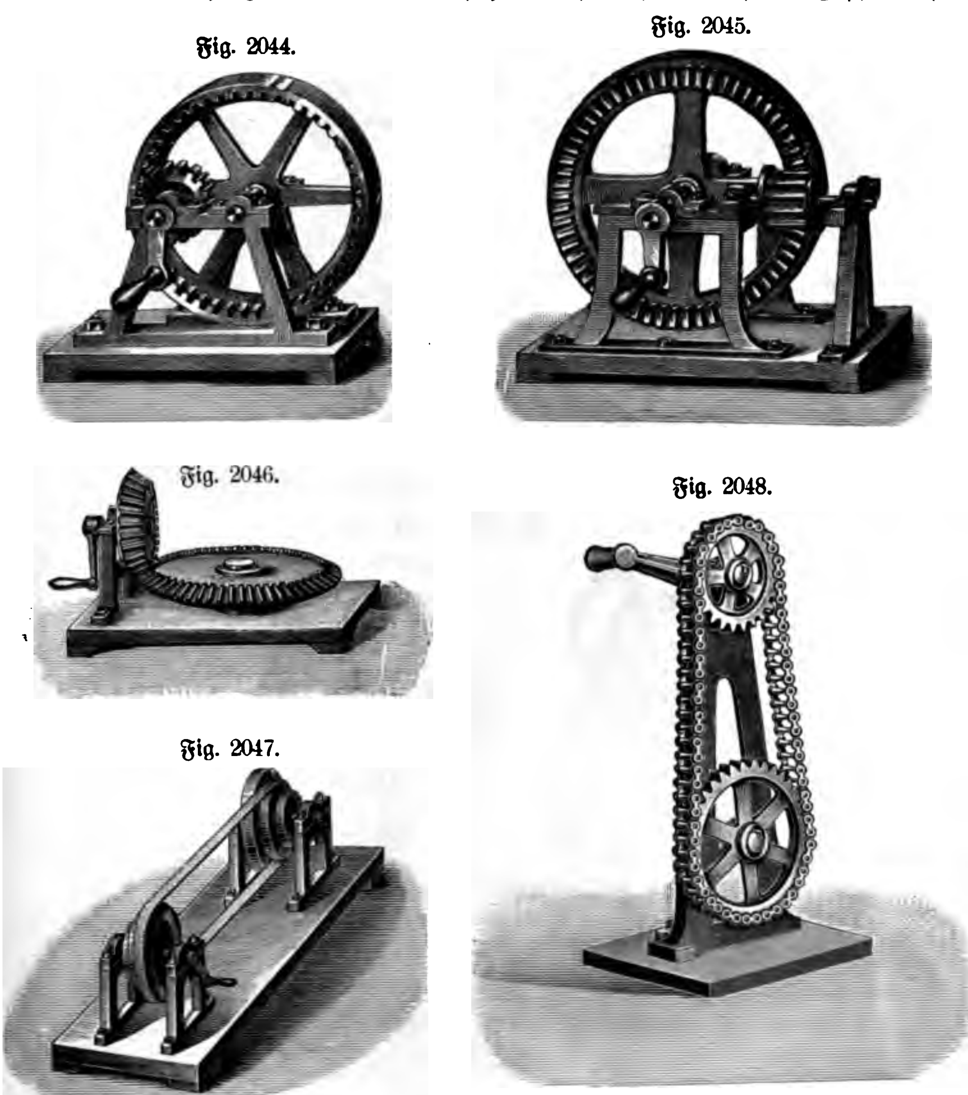


Fig. 2044. Fig. 2045. Fig. 2046. Fig. 2047. Fig. 2048.

gesteckte Apparat bei einer Umdrehung der Kurbel an dem Sternrade 30 Umdrehungen vollzieht. — Legt man den ganzen Apparat auf die Seite, so daß die Fläche des Sternrades horizontal liegt, so wird die vorher horizontale Bewegung der aufgesteckten Apparate eine vertikale, und das Kammrad heißt nun Kronrad.

Dreht man die Kurbel des 24zähnigen konischen Rades einmal herum, so machen die 18- und 30zähnigen $1^1/_3$ Umdrehungen, und die vertikale Drehung ist horizontal geworden. Dreht sich das 30zähnige Rad einmal herum, so macht das 20zähnige $1^1/_2$ Umdrehungen, so daß mithin bei einer Umdrehung der Kurbel

das Sternrad 2 Umdrehungen vollendet und ein Aufsatz an dem Zapfen des Apparates deren 60 beschreibt.

Diese tatsächlichen Nachweise sind für die Schüler überzeugend und erleichtern das Verständnis der Berechnung. Es mag dabei noch bemerkt werden, daß man in der Praxis keine so einfachen Zahlenverhältnisse wählt, sondern wo möglich relative

Fig. 2049.



Fig. 2050.

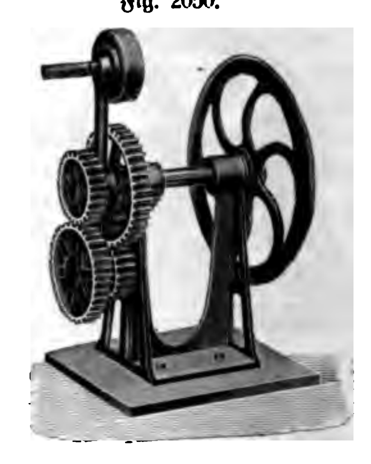


Fig. 2051.

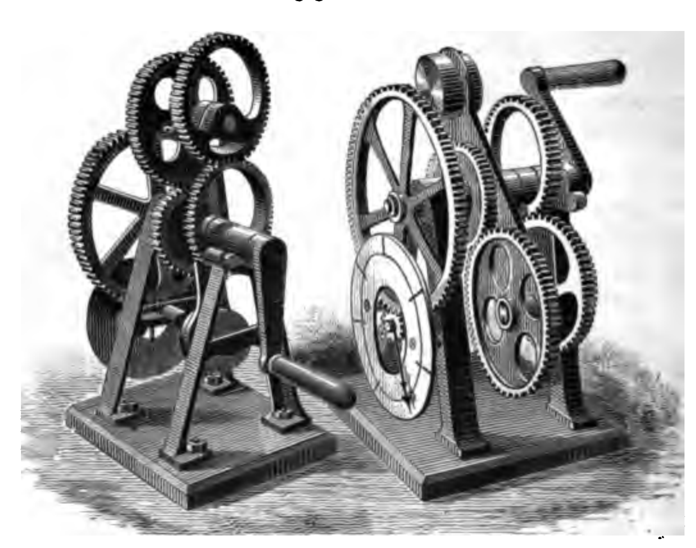
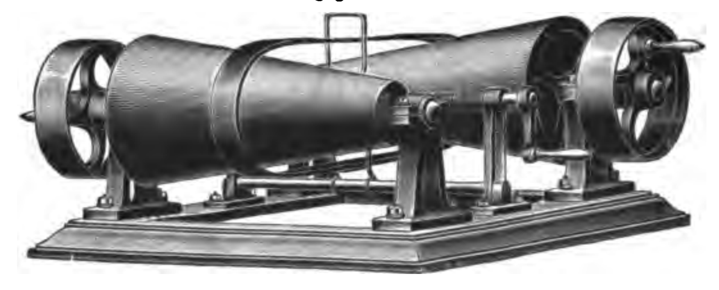


Fig 2052.



Primzahlen, damit jeder Zahn des einen Rades nach und nach mit jedem des anderen zum Eingreifen kommt und sich so die Zähne sämtlich gegenseitig abschleifen.

Einfache Modelle zeigen die Figuren 2043 E, 42; 2044 E, 48; 2045 E, 100; 2046 Lb, 15; 2047 E, 70; 2048 E, 95; 2049 E, 80; 2050 E, 90. (Satellitenräder.) Auch die Räderuhren können eventuell hier erwähnt werden.

Die Wirkung von Ellipsen- und Satellitenrädern zeigt der Apparat von Mac Cord (Fig. 2051). (S. Schwartze, Naturw.-techn. Umschau 2, 295, 1886.)

Ein Modell einer Riementransmission mit veränderlicher Geschwindigkeit nach Fig. 2052 liefert G. Lorenz in Chemnitz zu 50 Mk.

Erstes Kapitel.

Statik.

13. Das Trägheitsgesetz. War anfänglich davon die Rede, daß wir unwillkürlich bei allem was geschieht nach der treibenden Kraft suchen, daß sich die Alten die Sonne auf einem unsichtbaren, von Pferden gezogenen Wagen fahrend dachten u. s. w., so weist anderseits die Regelmäßigkeit der Bewegung der Gestirne, die langandauernde Bewegung eines einmal angestoßenen Schwungrades darauf hin, daß nicht alle Bewegungsvorgänge einer beständigen Kraftwirkung bedürfen und bereits Aristoteles unterschied deshalb die kreisenden Bewegungen als natürliche von den übrigen, die eine Kraft erfordern, den gezwungenen. Zu einem klaren Einblick in diese Verhältnisse gelangte aber erst sehr viel später Galilei (1638), Professor in Pisa (vorübergehend in Padua). Ihm verdankt man die ersten sicheren Grundlagen der Bewegungslehre, weshalb er auch der „Vater der modernen Physik" genannt wird; vor allem das Gesetz der Trägheit. Er erkannte, daß die natürliche Bewegung nicht die kreisende ist, sondern die geradlinige und daß ein einmal in Bewegung gesetzter Körper die Größe und Richtung seiner Geschwindigkeit beibehält, bis eine Kraft auf ihn einwirkt, worin auch der Spezialfall eingeschlossen ist, daß ein ursprünglich in Ruhe befindlicher Körper nicht von selbst in Bewegung geraten kann.

14. Kraftmessung. Da die Wirkung einer Kraft in der Erzeugung von Bewegung besteht, so liegt es nahe, eine Messung der Kräfte auf die Messung der hervorgebrachten Bewegungszustände zu gründen, wie es später auch wirklich geschehen soll[1]).

[1]) Die Mehrzahl der Lehrbücher setzt aus diesem Grunde die Dynamik voran und beginnt mit einer ausführlichen Darlegung der Gesetze des freien Falles mittels der Atwoodschen Fallmaschine. Ich halte dies nicht für notwendig, da zur Behandlung des Gleichgewichts der Kräfte die relative Kraftmessung durch Vergleichung zureicht, wohl aber für unpraktisch. Jenes Verfahren hat nämlich den Nachteil, daß manchem Schüler durch die für ihn schwer verständlichen Betrachtungen über dynamische Kraftmessung der physikalische Unterricht von vornherein verleidet wird. Schwer verständlich sind diese Auseinandersetzungen schon deshalb, weil sie, wie in dem Folgenden gezeigt wird, auf Definitionen beruhen, welche hinsichtlich der Klarheit und Vollständigkeit sehr viel zu wünschen übrig lassen. Wäre der Nachweis geführt, daß wirklich alle Naturerscheinungen nur versteckte Bewegungsvorgänge sind und wahre Kräfte nur Systeme von Trägheitskräften, dann wäre es allerdings geboten, mit Dynamik zu beginnen. Bis jetzt besteht aber keine Aussicht, daß dieser Beweis jemals zu erwarten sein wird, eher könnte man

Schieben z. B. Arbeiter einen Eisenbahnwaggon, so ist klar, daß sie ihn in um so rascheren Lauf bringen werden, je größer ihre Kraft. Zehn Arbeiter werden vielleicht eine zehnmal so große Geschwindigkeit erzielen wie ein einzelner. Wir machen dabei aber auch sofort die Erfahrung, daß es nicht einerlei ist, ob der Waggon leer oder belastet ist, es ist auch nicht einerlei, ob das Schieben etwa nur eine Minute oder fünf Minuten lang fortgesetzt wird. Ist nun aber dabei diese Dauer der Kraftwirkung maßgebend oder die Strecke längs welcher geschoben wurde? Augenscheinlich ist es nicht ganz einfach, ein Maß für die Kraft zu finden auf Grund der von ihr hervorgebrachten Beschleunigung.

Es kommt hinzu, daß zwei Kräfte sich in ihren Wirkungen teilweise oder ganz hindern können. Schieben z. B. an dem gleichen Wagen zwei Arbeiter in entgegengesetzter Richtung, so daß keine Bewegung zustande kommt, so kann man hieraus keineswegs den Schluß ziehen, daß keine Kraft vorhanden sei; wohl aber kann man den Schluß ziehen, daß die Kräfte der beiden Arbeiter gleich sind. Wir gelangen hierdurch zu einer anderen Art der Messung von Kräften, welche weit einfacher und die im täglichen Leben gebräuchliche ist.

Wollen z. B. zwei Turner ihre Kraft vergleichen, so ziehen beide an dem gleichen Seil nach entgegengesetzten Richtungen. Kompensieren sich die Wirkungen, bewegt sich das Seil nicht, so müssen selbstverständlich die Kräfte gleich sein. Ähnlich kann ich z. B. die Kraft meines Armes vergleichen mit der einer gespannten Feder. Suche ich z. B. einen vertikal im Boden befestigten Stahlstab zur Seite zu biegen oder eine aufgehängte Spiralfeder zu dehnen, so begegne ich einem wachsenden Widerstand, der schließlich so groß wird, daß Kompensation eintritt, ich schließe deshalb auf das Vorhandensein einer besonderen Federkraft, welche in diesem Momente meiner Muskelkraft gleich ist.

Beim Heben von Gewichtsstücken von steigender Größe treffe ich schließlich auf eines, welches ich nicht mehr zu heben vermag; ich schließe hieraus auf die Existenz einer Schwerkraft, und die Schwere oder das Gewicht des fraglichen Gewichtstückes wäre ein Maß meiner Muskelkraft.

Auch beim Fortschieben eines Körpers auf rauher Unterlage treffe ich auf einen Widerstand, den ich einer besonderen Reibungskraft zuschreibe. Dieselbe könnte ebensogut statt meiner Muskelkraft der Kraft einer Feder oder der Schwere eines Gewichtes das Gleichgewicht halten, muß also notwendigerweise eine Kraft sein, obschon sie nicht wie jene im stande ist Bewegung zu erzeugen, sondern nur zu hemmen. Nach diesem Prinzip ist man also im stande, alle Kräfte z. B. mit der Schwerkraft zu vergleichen und indem man ein bestimmtes Gewicht als Einheit festsetzt, sie durch Zahlen auszudrücken. Einer solchen Einheit bedurfte bereits der Kaufmann des Altertums, denn wenn auch Längen-, Flächen- und Körpermaße im Prinzip ausreichend sind, die Mengen der zu kaufenden oder verkaufenden Waren

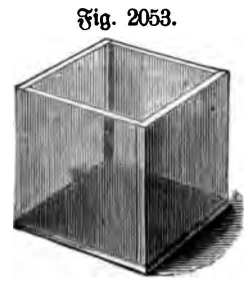
---

an den Beweis des Gegenteils denken und die neuesten Untersuchungen über Elektronen (Abraham), Kathodenstrahlen und radioaktive Substanzen haben sogar zu dem Ergebnis geführt, daß auch unwägbare, also masselose Elektrizitätsteilchen ihrer Bewegung scheinbare Trägheit entgegensetzen, beruhend auf Bildung magnetischer Energie, und daß sie beim Aufstoßen auf materielle Teilchen auf diese Stoßkräfte ausüben (die sogar eine Zertrümmerung herbeiführen können), wie wahre Massen vermöge der ihnen innewohnenden Bewegungsenergie. Vielleicht ist der Begriff der Masse, der bei der dynamischen Kraftmessung eine hervorragende Rolle spielt, in Wirklichkeit durch elektromagnetische Wirkungen zu erklären. In diesem Falle müßte die Mechanik aus den Sätzen der Elektrodynamik abgeleitet und demgemäß die Elektrizitätslehre an den Anfang der Physik gestellt werden.

festzustellen, so ist doch häufig die Ausmessung oder Berechnung eine so umständliche, daß sie sich praktisch nicht durchführen läßt. Da nun selbstverständlich die doppelte Menge Stoff mit der doppelten Kraft von der Erde angezogen wird, überhaupt die dem Volumen nach m-fache Menge desselben Stoffs das m-fache Gewicht hat, so kann man das Volumen nach dem Gewicht beurteilen. Man wird z. B. die Länge einer großen Menge von aufgespultem Faden oder Draht einfacher als durch Ausmessen mittels des Maßstabes durch Bestimmung des Gewichtes feststellen; ebenso die Fläche eines großen Ballens Tuch oder das Volumen einer größeren Menge von Feldfrüchten u. s. w. Auch der Architekt und Ingenieur bedurfte einer Gewichtseinheit zur Bemessung der Masse (Stoffmenge) der zu transportierenden Lasten und der zum Transport derselben aufzuwendenden Kräfte.

Bei Festsetzung der Gewichtseinheit hätte man nun ebenso verfahren können, wie ehemals bei Festsetzung der Längeneinheit, d. h. man hätte etwa die Kraft des Königs, gemessen durch die Schwere des Gewichtssteines, den er eben noch zu heben vermochte, als Gewicht 1 bezeichnen können. Indes bot sich ein einfacherer Weg, die Zurückführung auf die Volumeneinheit. Man wählte nämlich als Gewichtseinheit, Talent genannt, das Gewicht der Wassermenge, welche ein würfelförmiges Gefäß [1]) aufnehmen konnte, dessen Seitenlänge eine Spanne (gleich eine halbe Elle) war (etwa 23,3 kg [2]). Dasselbe Prinzip behielt man bei nach Einführung des Meters als Längeneinheit. Als Einheit des Gewichts (Kilogramm) wurde festgesetzt das Gewicht von 1 Kubikdezimeter [1]) Wasser im Zustande seiner größten Dichte (4° C. [3]).

Fig. 2053.



Da man nun bei Eichung von Gewichtstücken natürlich nicht jeweils diese schwierige Vergleichung ausführen kann, so wurde auch diese Gewichtseinheit (das Kilogramm), ähnlich wie das Meter durch ein in Platin ausgeführtes Normalmaß dargestellt. Spätere Untersuchungen ergaben, daß dasselbe ähnlich wie das Meter nicht genau ausgefallen, sondern 153 mgr zu schwer ist. Aus diesem Grunde wird analog heute als wahre Gewichtseinheit das Gewicht jenes in Paris aufbewahrten Platinstückes (Archivkilogramm) betrachtet. Auch hierbei ist also die ursprüngliche Absicht, ein für den Fall des Verlustes mit absoluter Genauigkeit reproduzierbares Maß festzustellen, nicht erreicht worden. Im strengen Sinne ist weder das Meter, noch die Sekunde, noch das Kilogramm ein absolutes Maß.

15. Die Eichung der Kraftmesser und Gewichtstücke. Als Federwage gebrauche ich eine 2,5 m lange, 42 mm weite Spiralfeder aus 3 mm dickem Stahldraht, welche an der Decke befestigt wird und unten eine Wagschale trägt. Auf

[1]) Würfelförmige Glaskasten mit Deckel von 1 cbdm nach Fig. 2053 sind zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln zu 10 Mk. — [2]) Von Dungi I (2650 v. Chr.) war als Gewichtseinheit das Wassergewicht des Kubus vom Zehntel der Doppelelle, die schwere babylonische Mine = 982,4 g eingeführt worden. Nabukuduruşur II (der biblische Nebukadnezar) sorgte für korrekte Wiedereinführung derselben. — [3]) Wollte man konsequent sein, so müßte das Gewicht von 1 cbm Wasser, die Tonne als Krafteinheit gewählt werden. 1 kg wäre dann als 1 Milli-Tonne zu bezeichnen. Da das Wort Tonne ein Volumen bezeichnet, eignet es sich indes besser zur Bezeichnung einer Masseneinheit. Statt des Wortes „Gewicht", welches eigentlich Masse bedeutet, wird wegen der Zweideutigkeit dieses Wortes besser das Wort „Schwere" gebraucht.

einer dahinter gestellten Skala kann die Verlängerung abgelesen werden, welche pro Kilogramm 0,5 m beträgt. Die größte Belastung, welche mit Rücksicht auf die Raumverhältnisse aufgelegt werden kann, beträgt 5 kg. Zur Herstellung des Kilogramms dient ein Hohlwürfel aus Glas von 1 cbdm Inhalt. (Fig. 2053.)

Man füllt denselben bis zum Rande mit Wasser und streicht den Überschuß durch Aufschieben des geschliffenen Glasdeckels ab. Hatte man das Gefäß leer auf die Federwage gesetzt und die Verlängerung notiert, so entspricht die nun eintretende Verlängerung dem Zug von 1 kg. Ersetzt man nun das Wasser durch ein Gewichtsstück und erzeugt dieses die nämliche Verlängerung, so wiegt es ebenfalls 1 kg. Nehme ich dieses ab und ersetze es durch ein, eventuell durch Befeilen oder Anlöten von Blei richtig zu justierendes anderes Gewichtstück, welches bei gleicher Länge der Spirale der Federkraft das Gleichgewicht hält, so folgt die Schwerkraft, das Gewicht dieser Masse ist gleichfalls 1 kg, **weil beide gleich der Federkraft sind.** So können leicht beliebig viele kg-Stücke hergestellt werden.

Fig. 2055.

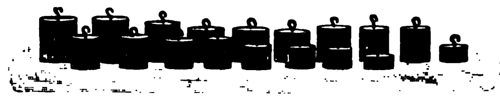
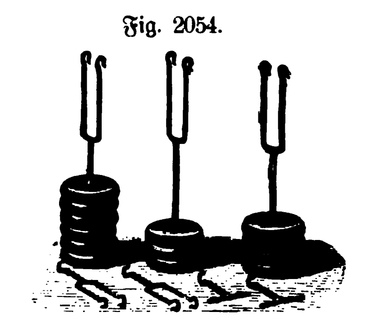


Fig. 2056.



Fig. 2054.



16. Superposition der Kräfte. Hänge ich nun zwei Kilogrammstücke zugleich an, stelle mir dann auf gleiche Art ein Stück her, welches ebenso stark zieht wie beide, hänge dann dieses + 1 kg an, so finde ich, die beiden ziehen ebenso stark, wie wenn drei einzelne Kilogramm angehängt werden u. s. w. **Die Kräfte lassen sich somit wie Zahlen summieren.** Daraus ergibt sich ohne weiteres die Eichung der Federwage und die Eichung der Gewichtstücke. (**Parallelschaltung von Kräften.**)

Man kann sich Gewichte sehr leicht aus Blei verfertigen, indem man Cylinder von Blei in papierene Röhren gießt und davon entsprechende Stücke abschneidet; kleine messingene Ringe mit eisernen Schrauben erhält man sehr billig im Eisenladen, und die letzte Ausgleichung ist dann mit der Holzraspel und einem Messer leicht zu bewerkstelligen. Will man dieselben sauberer haben, so nimmt man sie mittels des für Holz bestimmten Dreispitzes an die Drehbank, macht sie blank und firnißt sie. Das Justieren geschieht dann ebenfalls durch Abdrehen, wobei man den Ring mit der Schraube jedesmal mit auf die Wage legt. Wünscht man diese Gewichte von Messing, so dürfte es am zweckmäßigsten sein, sie fertig zu kaufen[1]).

[1]) Verschiedene Formen von Gewichten sind in den Figuren 2054 K, 15; 2055 K, 85; 2056 K, 18 dargestellt. Hermann Stern, Edelsteinschleiferei, Oberstein (Oldenburg), liefert Gewichte und Maße aus Bergkristall.

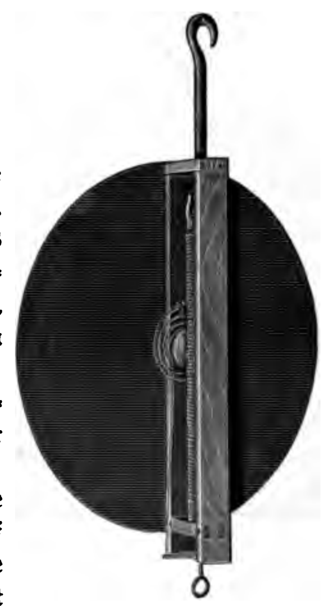
Auf sehr einfache Art kann man diesen Zweck auch mittels Nickelmünzen erreichen. Man läßt sich dazu kleine Büchschen von Blech machen, welche an drei Schnürchen aufgehängt sind, ihr Gewicht selbst wird dann je nach ihrer Größe auf eine bis sechs solcher Münzen abgeglichen und diese Zahl darauf gestempelt. Um wenige Groschen erhält man die erforderliche Zahl solcher Büchschen sauber aus dünnem Messingblech gearbeitet, und die Abgleichung ihrer Gewichte kann man selbst machen. Die Nickelmünzen aber behalten ja ihren wirklichen Wert, sind für diese Zwecke hinreichend gleich schwer und sehr schnell in der erforderlichen Menge eingezählt.

Übrigens kann man auch solche Büchschen mit einem Deckel, der ein kleines Loch und einen Haken trägt, zulöten, durch das Loch mit einem bestimmten Gewichte Sand füllen und die Öffnung mittels Siegellack oder Kautschuk, welches beim Justieren mitgewogen wurde, verschließen. Man kommt so sehr wohlfeil zu einer beliebigen Anzahl von Gewichten.

Außer den Gewichten bedarf man einiger Wagschalen, deren Gewicht genau ausgemittelt und auf denselben verzeichnet ist. Zweckmäßig verfährt man, wenn ihr Gewicht auf ganze Gramme reguliert wird.

17. Die Federwagen und Dynamometer. Zu Vorlesungszwecken benutze ich gewöhnlich ein selbst hergestelltes Dynamometer, welches Fig. 2057 von der Seite gesehen zeigt. Der Hauptteil ist eine starke Spiralfeder, deren Ende durch eine Kette mit einer Rolle in Verbindung steht, die einen langen Zeiger auf einem kreisförmigen Zifferblatt von 80 cm Durchmesser in Drehung versetzt. Es reicht von 0 bis 60 kg. Teilung und Zeiger sind weithin sichtbar.

Fig. 2057.



Andere Formen von Dynamometern zeigen die Figuren 2058 und 2059 Lb, 5; 2060 E, 5 u. 2061.

Man kann mittels eines solchen Dynamometers zunächst die Muskelkraft des Armes messen. Sie beträgt im Mittel 50 kg. Dabei wäre zu erwähnen, daß sie nach der Tageszeit verschieden groß gefunden wird [1]).

Man kann auch darauf hinweisen, daß sie abhängig ist von der Tätigkeit und mit angestrengter Tätigkeit allmählich erschlafft. (Ermüdung.)

Ferner kann man die Verschiedenheit der Kräfte der Arm- und Beinmuskeln konstatieren und darauf aufmerksam machen, daß auch aus diesem Grunde die Kraft eines Mannes mit der eines Pferdes nicht

---

[1]) Die Zug- und Druckkraft, welche ein Mann ausüben kann, beträgt etwa 50 kg, die Kraft eines Pferdes 200 bis 300 kg. Der Mensch ist am schwächsten frühmorgens unmittelbar nach dem Aufstehen, nach dem Frühstück wächst die Kraft bedeutend und erreicht ihren höchsten Wert unmittelbar nach dem Mittagessen. Darauf sinkt sie für einige Stunden, hebt sich nochmals gegen Abend und sinkt dann wieder bis zum Morgen (nach Buch). Nach Regnier beträgt die Zugkraft der Schenkel 150 kg, also gerade das dreifache von derjenigen der Hände.

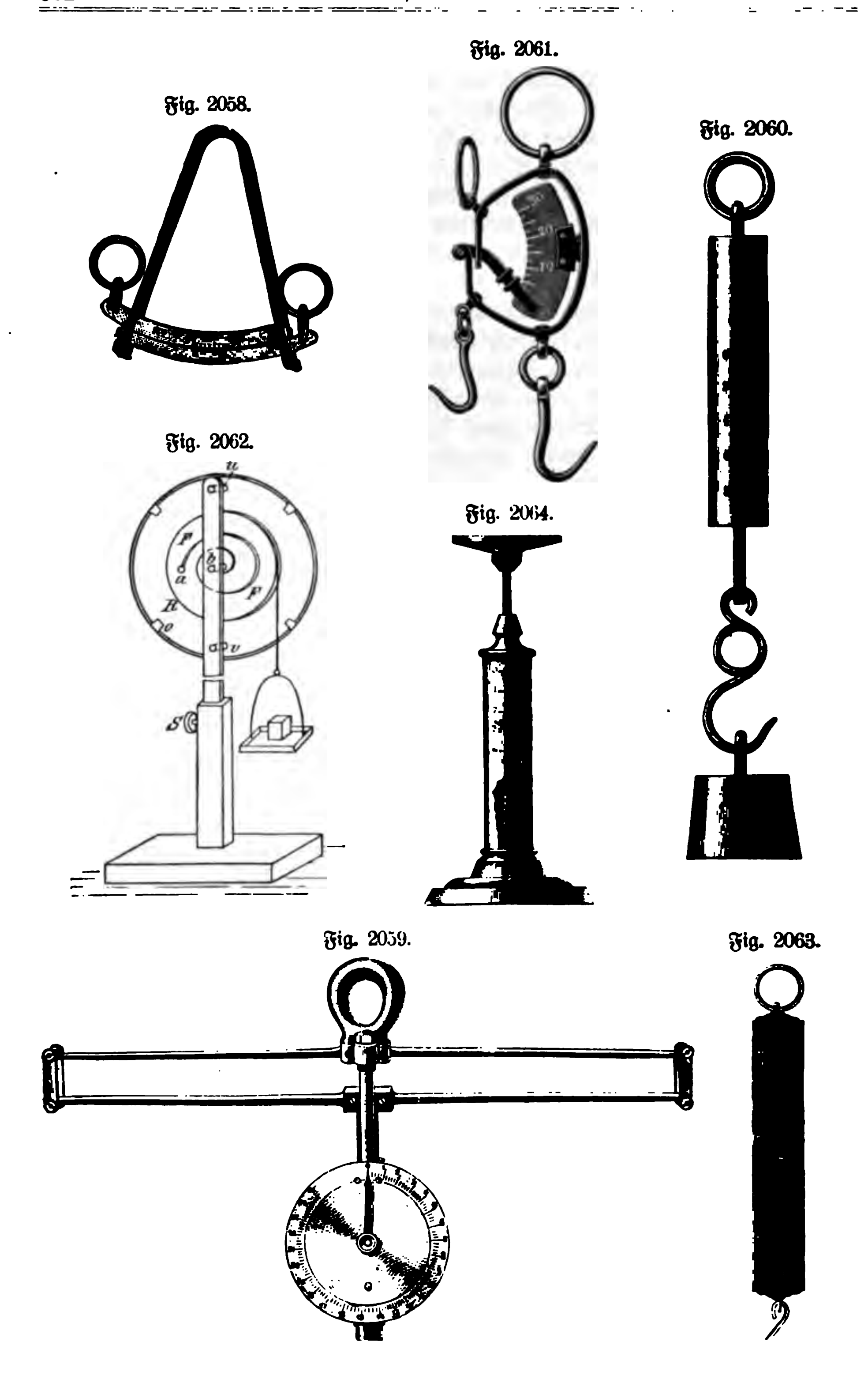


Fig. 2061.

Fig. 2058.

Fig. 2060.

Fig. 2062.

Fig. 2064.

Fig. 2059.

Fig. 2063.

einfach zahlenmäßig zu vergleichen ist (1 Mann = $^1/_{10}$ Pferd) u. s. w. (Über „Pferdekraft“ siehe S. 670.)

Zur Messung kleinerer Kräfte verwendet Neu Spiralfedern („Meßdrähte“), bestehend aus sogenanntem Hosenträgerdraht, dünnem schraubenförmig gewundenem Messingdraht. Der äußere Durchmesser der Windungen beträgt bei der benutzten Sorte nur 2,5 mm, der Drahtdurchmesser 0,37 mm. Die Verlängerung ist der Belastung bis zu einem Maximum von etwa 300 g sehr nahe proportional und ziemlich bedeutend, indem sie für eine Belastung von 200 g etwa $^1/_2$ der ursprünglichen Länge des Drahtes beträgt. Die zur Verwendung kommenden Meßdrähte geben sämtlich für 200 g eine Verlängerung von 10 cm, sind also etwa 20 cm lang und haben dabei ein Eigengewicht von etwa 3 g. Die Dauer der Belastung ist bis zu 300 g von so geringem Einfluß, daß sie bei der angegebenen Länge (20 cm) selbst nach einer Stunde kaum erkennbar ist. Selbst bei 400 g Belastung, wobei sich also die Länge der Spiralen verdoppelt, ist noch keine bleibende Änderung bemerkbar,

Fig. 2065.



Fig. 2066.



doch reicht eine Belastung mit 300 g für alle Versuche aus. Dadurch, daß mehrere Drähte nebeneinander geschaltet werden, kann die Tragkraft, durch Hintereinanderschalten die Empfindlichkeit erhöht werden.

Die Enden eines Meßdrahtes sind mit Ringen versehen, mittels deren derselbe zwischen zwei mit Kopf versehenen Stiften ausgespannt werden kann. Diese Stifte sind in hölzerne 4 cm lange Schieber eingetrieben, welche sich in einer schwalbenschwanzähnlichen Nut verschieben lassen und durch Federn mit genügend starker Reibung gegen die Führungsschienen angedrückt werden, um einerseits mit Sicherheit eine relativ beträchtliche Belastung auszuhalten, anderseits auch, nachdem durch einen leichten Druck der Kontakt aufgehoben ist, sich leicht in der Nut verschieben zu lassen. Hängt ein Meßdraht vertikal und wird nun etwa durch ein an den unteren Ring angehängtes Gewicht gespannt, so tritt zunächst keine Verlängerung ein, da der untere Ring durch den Stift, über welchen er geschoben ist, festgehalten wird. Verschiebt man nun aber den oberen Schieber aufwärts, so wird schließlich

ein Punkt kommen, bei welchem der Ring nicht mehr fest an dem Stift anliegt, um dann bei noch weitergehender Verschiebung sich mit der diametral entgegengesetzten Stelle an den Stift anzulegen. Die Verschiebung des oberen Schiebers, bis der Ring sich löst, die an einer angebrachten Millimeterskala abgelesen werden kann, gibt die Verlängerung der Spiralfeder und ist dann der Kraft proportional. Der Fehler der Bestimmung wurde im Maximum zu 2 Proz. gefunden. Alles Tarieren von Wagschalen, Rollen u. s. w. wird bei dieser Methode der Gewichtsbestimmung oder Kraftmessung unnötig, da eben die Anfangsstellung jeweils erst nach Anbringung der Vorrichtungen bestimmt wird. Die Handhabung ist außerordentlich sicher, da die Feder durch die beiden Stifte gehindert ist, sich zu verlängern, falls eine unbeabsichtigte zu starke Belastung stattfindet; die Reibungswiderstände sind meist zu eliminieren und die Messung kann in gleicher Weise bei allen Versuchen ausgeführt werden, so daß eine einheitliche Methode erzielt wird.

Kleiber (Z. 17, 141, 1904) benutzt die in Fig. 2062 dargestellte leicht selbst herzustellende Federwage, bei welcher eine Spiralfeder *FF* durch eine über eine Rolle geführte belastete Schnur gespannt wird.

Fig. 2067.



Die im Handel zu beziehenden kleinen Federbriefwagen (Fig. 2063 K, 5) sind ebenfalls zu gleichem Zwecke empfohlen worden[1]). Man hat dabei nur den zum Halten des Briefes dienenden Drahtbügel zu entfernen und durch einen passenden Haken zu ersetzen.

Daß das Dynamometer, welches eigentlich Kräfte mißt, auch als Wage, d. h. zur Ermittelung von Stoffmengen, d. h. des Volumens, dienen kann, ist nach dem oben Gesagten naheliegend. Kleine Dynamometer werden häufig gebraucht als Briefwagen (Fig. 2064), größere als Haushaltungswagen (Fig. 2065 K, 36), sehr große zum Messen an Kranen hängender großer Lasten[2]). Für physikalische Zwecke ist zur Bestimmung sehr kleiner Gewichte die Jollysche Federwage (Fig. 2066 E, 53) in Gebrauch, zur Messung der geringsten Kräfte wie bei magnetischen und elektrischen Messungen die Torsionswage. (Siehe darüber bei Elastizität.)

Wie W. Kohlrausch (Elektrotechnische Zeitschrift 1886) durch eingehende Messungen erwiesen hat, herrscht gegen die Federwagen ein nicht ganz unbegründetes Vorurteil, welches wahrscheinlich zum Teil daher rührt, daß auf Grund der im Deutschen Reiche geltenden Bestimmungen der Eichordnung die Federwagen im

[1]) Shaw, Z. 8, 166, 1895. — [2]) Zu beziehen von Sonnenthal jun., Berlin.

allgemeinen vom öffentlichen Verkehr ausgeschlossen sind, abgesehen vom Verwägen von Eisenbahnpassagiergepäck und Postpackereien, wo es sich um rasches Arbeiten handelt. Es verlangt nämlich die Eichordnung eine Genauigkeit von 0,05 bis 0,2 Proz., welche eine Federwage nicht zu bieten vermag. Für sehr viele Fälle und namentlich für Demonstrationszwecke ist aber ein so hoher Grad von Genauigkeit unnötig, also die Federwage wohl zu gebrauchen.

Um das Prinzip der Torsionswage[1] zu erläutern, benutze ich die bereits S. 17 erwähnte Torsionsvorrichtung an der Decke (vergl. Fig. 494), welche durch über Rollen geführte Schnüre vom Auditorium aus betätigt werden kann. Es wird ein etwa 3 mm dicker, 6 m langer gerader Messingdraht eingespannt, dessen unteres Ende durch eine etwa 1 m lange dicke Messingstange beschwert ist. An den Enden der letzteren sind über Rollen geführte Schnüre mit Wagschalen angebracht, welche ein Drehmoment erzeugen. Die Nullstellung des Stabes wird durch Ständer fixiert. Belastet man die Wagschalen, so tritt eine Verdrillung des Drahtes ein, welche man mittels der Torsionsvorrichtung kompensiert, so daß der Stab wieder die Nullstellung erlangt. Man kann durch successiv steigende Belastung die Werte der Teilstriche der Skala an der Torsionsvorrichtung in Grammen ermitteln, so daß dann jede beliebige drehende Kraft leicht gemessen werden kann. (Fig. 2067.)

18. Wahre Kräfte und Trägheitswiderstände. Die durch ein Dynamometer gemessene Kraft entspricht der im Altertum üblichen Auffassung, welcher zufolge alles was einer Kraft das Gleichgewicht halten kann, ebenfalls eine Kraft sein muß. Die Folgezeit hat gelehrt, daß diese Auffassung nicht richtig ist. Schiebt z. B. ein Arbeiter einen Wagen, so empfindet er einen Gegendruck, den sogenannten Trägheitswiderstand des Wagens, und eine zwischen ihn und den Wagen eingefügte Federwage würde erkennen lassen, daß dieser Trägheitswiderstand ebenso groß ist wie die Wirkung seiner Muskelkraft (Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung von Newton). Die Feder wird von beiden Seiten gedrückt und befindet sich unter dem Einfluß der beiden Kräfte im Gleichgewicht, somit müßten diese nach der alten Auffassung beide wahre Kräfte sein.

Gleiches gilt, wenn zwei durch eine Feder verbundene, in der Drehungsebene verschiebbare Massen auf der Schwungmaschine im Gleichgewicht sich befinden. Die Feder spannt sich, bis schließlich ihre elastische Kraft den beiden Zentrifugalkräften gleich geworden ist.

In Wirklichkeit besteht ein großer Unterschied zwischen wahren Kräften und Trägheitswiderständen, der sich in erster Linie erkennen läßt durch die verschiedene Zahl der Angriffspunkte.

19. Angriffspunkte. Unsere Muskelkraft kann nur durch Berührung wirken. Sie muß den Körper an einem bestimmten Punkte angreifen. Ebenso schreiben wir jeder anderen Kraft einen Angriffspunkt zu.

Eine wahre Kraft hat stets zwei Angriffspunkte, ein Trägheitswiderstand nur einen[2]). Der Arbeiter, welcher den Wagen schiebt, wirkt nicht nur durch den Druck der Hände auf den Wagen, sondern gleichzeitig durch

[1]) Über eine in Form einer Tafelwage konstruierte amerikanische Torsionswage siehe Zeitschr. f. Instrumentenkunde 10, 433, 1890. — [2]) Archimedes erbot sich die Welt aus den Angeln zu heben, wenn man ihm einen zweiten Angriffspunkt für seine Kraft verschaffen könnte.

den Druck der Füße gegen die Erde und zwar nach dem Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung mit derselben Kraft. Die Erde wird tatsächlich in entgegengesetzter Richtung verschoben wie der Wagen, nur können wir dies nicht beobachten, weil wir selbst auf der Erde stehen und uns gleichzeitig mitverschieben. Außerdem ist der Betrag der Verschiebung außerordentlich gering. Die Wirkung tritt aber sofort hervor, wenn der Arbeiter anstatt auf der Erde auf einem anderen Wagen stehend den ersten zu verschieben sucht. Er treibt dann beide in gleicher Weise auseinander und die Tatsache, daß seine Kraft zwei Angriffspunkte besitzt, tritt sehr deutlich und auffällig hervor.

Gleiches gilt für das andere Beispiel. Die gespannte Feder zwischen den beiden Massen auf der Schwungmaschine wirkt auf beide gleichzeitig in entgegengesetzter Richtung, besitzt also ebenfalls zwei Angriffspunkte.

Anders die Trägheitswiderstände. Sowohl der Widerstand des Wagens wie die Zentrifugalkräfte der beiden kreisenden Massen haben nur einen einzigen Angriffspunkt. Dasselbe gilt für den Widerstand eines Kreisels. Jedenfalls gehört zum Begriff der wahren Kraft durchaus auch der des Vorhandenseins der beiden Angriffspunkte und es ist unrichtig, wie es manchmal geschieht, eine Kraft zu definieren als das Produkt von Masse und Beschleunigung, wobei das Vorhandensein der beiden Angriffspunkte nicht zum Ausdruck kommt [1]).

Allerdings gibt es scheinbare Ausnahmen. Beispielsweise kann man (nach W. Thomson) Systeme von Kreiseln ersinnen, deren Gesamtwiderstand (Trägheitswiderstand) an zwei Punkten angreift, wie ja auch das System der beiden Schwungmassen, als einziger Kraftträger gedacht, zwei Angriffspunkte besitzt. Gerade die Stabilität der Kreiselachse im Raume zeigt aber, daß den Trägheitskräften noch ein weiteres Kennzeichen zukommt, welches sie von wahren Kräften leicht unterscheiden läßt, eine bestimmte Richtung im Raume. Eine Hohlkugel, welche eine gespannte Feder enthält, läßt sich beliebig wenden und drehen, nicht aber eine solche, in welche ein rotierender Kreisel eingeschlossen ist.

Es ist auch ganz unmöglich, eine einzige wahre Kraft durch zwei Trägheitskräfte zu ersetzen, denn solche können nur dann zur Wirkung kommen, wenn eine wahre Kraft vorhanden ist, durch die sie im Gleichgewicht gehalten oder richtiger geweckt werden. Ohne wahre Kraft können sie nicht bestehen.

Auch für die Stoßkraft, welche eine gegen die Wand geschleuderte Kugel ausübt, und ähnlich für den Druck eines Gases oder Dampfes gilt dasselbe.

Die stoßende Kugel kann keine Kraft ausüben. Der Druck wird vielmehr hervorgebracht durch die beim Zusammenstoß auftretenden Molekularkräfte, welche nach zwei entgegengesetzten Richtungen wirken, einesteils gegen die Wand, andernteils gegen die Kugel, und deren Trägheitswiderstand überwinden.

Ein System solcher stoßenden Körperchen, als welches sich die kinetische Theorie ein Gas denkt, wirkt allerdings nach zwei entgegengesetzten Richtungen, z. B. bei der Dampfmaschine auf Kolben und Cylinderboden, und kann insofern scheinbar als wahrer Kraftträger betrachtet werden. Auch kann ein Gefäß mit komprimiertem Gas ohne Widerstand beliebig im Raume verschoben oder gedreht werden.

[1]) Außerdem mißt jenes Produkt nicht die Kraft, sondern im allgemeinen den Unterschied entgegengesetzter Kräfte. Die Beschleunigung kann gleich Null sein, so daß der Definition gemäß keine Kraft vorhanden wäre, und dennoch kann eine große Zahl von Kräften vorhanden sein, die miteinander im Gleichgewicht sind.

Trotz der prinzipiellen Verschiedenheit von wahren Kräften und Trägheitskräften ist es also scheinbar nicht ausgeschlossen, die ersteren als Systeme der letzteren zu betrachten [1]) und allgemein die Kraftwirkungen zu erklären durch verborgene Bewegungen (Hertz). In Wirklichkeit muß man aber Verkuppelungen der Massen annehmen und an den Kuppelungsstellen Molekularkräfte, welche ein gegenseitiges Durchdringen der Massen verhindern, ebenso wie die Kohäsion der Wand das Eindringen der aufprallenden Kugeln hindert [2]). Wahre Kräfte sind zur Naturerklärung unentbehrlich.

20. Kraftrichtung und Achse. Zur vollständigen Kenntnis einer Kraft gehört ferner die Bestimmung ihrer Richtung. Gewöhnlich wird diese durch einen Pfeil angegeben und definiert als die Richtung der von der Kraft hervorgebrachten Bewegung. Da indes eine Kraft, wie gezeigt, zwei Angriffspunkte hat und zwei entgegengesetzte Bewegungen hervorbringt, ist dies nicht korrekt und man würde besser mit Faraday von der Achse der Kraft sprechen, d. h. der Verbindungslinie der beiden Angriffspunkte. Man kann dann den Satz aussprechen: „Eine Kraft sucht ihre Achse zu verlängern oder zu verkürzen, im ersten Fall heißt sie Druckkraft, im andern Fall Zugkraft."

Übrigens gibt es Fälle, wo dies anscheinend nicht zutrifft. Beispielsweise wirkt ein geradliniger Stromleiter auf einen frei beweglichen Magnetpol in einer Richtung senkrecht zur Verbindungslinie. Gleiches gilt von der durch den Magnetpol auf den Stromleiter ausgeübten Gegenwirkung. Man kann in solchen Fällen mit Faraday den Schluß ziehen, daß der Vorgang in Wirklichkeit nicht so einfach ist, wie er scheint, daß es keine direkte Fernwirkung zwischen Stromleiter und Magnetpol gibt, sondern die Wirkung vermittelt wird durch ein unsichtbares Zwischenmedium, welches selbst einen scheinbar leeren Raum erfüllt, den Äther. Man muß demselben, um solche Wirkungen zu erklären, allerdings eine sehr komplizierte Struktur zuschreiben, welche erinnert an die Einrichtung von Mechanismen mit Satellitenrädern (S. 656, Fig. 2049, 2050 und 2051).

Sehr häufig greift eine Kraft nicht in Punkten, sondern in Flächen an, wie z. B. die Reibung zwischen zwei aneinander gleitenden Körpern oder gar an räumlich ausgedehnten Stellen wie die Gravitationskraft. In solchen Fällen müssen wir, falls wir die Wirkung begreifen wollen, annehmen, daß es sich nicht um eine einzige Kraft, sondern um ein System von sehr vielen Kräften handelt, deren jede punktförmige Angriffspunkte besitzt, was natürlich voraussetzt, daß die Materie nicht kontinuierlich ist, sondern aus Atomen besteht.

21. Kraftträger. Nimmt man mit Newton Fernwirkungen an, so kann man auch von dem Ausgangspunkt einer Kraft, oder dem Kraftträger sprechen. Man kann z. B. sagen, die Erde zieht einen Stein oder den Mond gegen sich heran und umgekehrt. Weshalb aber die Kraft des Mondes auf die Erde der der

[1]) Diese Auseinandersetzungen sollen natürlich nicht im Unterricht gegeben werden, sie sind hier nur zur Orientierung beigefügt. — [2]) Hängt man einen Körper an einer Federwage auf und bringt darunter eine zweite nicht für Zug, sondern Druck eingerichtete Federwage, senkt alsdann die ersteren so weit, bis der Körper auf der zweiten aufsteht, so gibt diese eine Abnahme des Gewichts an, welche der von der anderen angegebenen Gewichtszunahme gleich ist.

Erde auf den Mond gleich sein soll, läßt sich aus dem Gesetz von Wirkung und Gegenwirkung nicht erkennen, da der Träger der Kraft ein anderer ist, somit auch die Kraft [1]).

Gleiches gilt von den elektrischen, magnetischen und elektrodynamischen Kräften und insbesondere auch von den sogenannten Molekularkräften, der chemischen Affinität der Atome u. s. w., die man sich gewöhnlich in gleicher Weise wirkend denkt wie Newtonsche Gravitationskraft. Mit Recht leugnet deshalb Faraday die Existenz solcher Kräfte, welche von einem Kraftzentrum ins Leere hinausstrahlen, und führt deren angebliche Wirkungen zurück auf das Vorhandensein von Kräften, welche zwei Angriffspunkte und eine Achse haben und ausgeübt werden von einem Medium, das sich zwischen den beiden Körpern befindet, von Kraftlinien oder Kraftfäden vergleichbar gespannten Muskeln.

22. Verschiebung des Angriffspunktes. Hängt man an das Dynamometer eine Schnur oder dünne Stange mit mehreren Haken zum Anhängen von Gewichten, so bleibt der Ausschlag stets derselbe, an welchen dieser Haken man das Gewicht anhängen mag. Der Angriffspunkt einer Kraft läßt sich also in ihrer Richtung beliebig verlegen. Hintereinandergeschaltete Spiralfedern wirken wie eine einzige Feder von größerer Länge (Fernewirkung, Kraftübertragung). Eine solche Serie von Kräften kann aber nicht durch einen Raum unterbrochen sein, welcher nichts enthält, da eine Kraft nur von einem Ding ausgeübt werden kann. Newtons Fernewirkung durch den leeren Raum ist deshalb unverständlich.

23. Arbeit. Zwei Arbeiter, welche mit dem Dynamometer gemessen dieselbe Kraft haben, sind deshalb doch nicht gleich leistungsfähig. Hat der eine geruht, während der andere mehrere Stunden angestrengt tätig war, so besitzt ersterer größeres Arbeitsvermögen, größere Energie.

Mittels des Dynamometers wurde festgestellt, daß zehn Mann hinsichtlich der Kraftleistung gleichwertig sind einem Pferd. Nichtsdestoweniger ist das Arbeitsvermögen, die Ausdauer, verschieden.

Es ist somit außer der Kraft noch ein anderer Begriff in Betracht zu ziehen, der der Arbeit einer Kraft.

Man definiert dieselbe gewöhnlich als Produkt der Kraft mit der Verschiebung ihres Angriffspunktes in ihrer Richtung. Im Grunde genommen ist diese Definition unzulässig, denn eine Kraft besitzt nicht einen, sondern zwei Angriffspunkte und für die von ihr geleistete Arbeit ist die absolute Verschiebung ihres Anfangspunktes gleichgültig. Die Erde bewegt sich mit allem, was sich darauf befindet, durch den Weltraum. Für irgend einen ruhenden Felsblock mag die Richtung der Bewegung übereinstimmen mit der Richtung der auf ihn wirkenden Schwerkraft. Nichtsdestoweniger leistet diese keine Arbeit. Ebenso wenig leistet die Schwere Arbeit bei der

---

[1]) Stößt ein bewegter Eisenbahnwaggon auf einen ruhenden, so entsteht durch Kompression der Puffer eine Kraft, die sie auseinander zu treiben sucht. Man spricht aber nur von der Kraft des stoßenden Wagens, nicht von der des gestoßenen. Schieben zwei Arbeiter zwei Waggons gegeneinander bis Gleichgewicht herrscht, so ist die eine Kraft die der komprimierten Puffer, die andere die der elastisch gezerrten Erde zwischen den Füßen der Arbeiter, man spricht aber davon, das Gleichgewicht bestehe zwischen den Kräften der letzteren.

Bewegung des Mondes um die Erde, obschon sie demselben beständig eine Beschleunigung gegen das Erdzentrum hin erteilt, so daß sich ihr Angriffspunkt in ihrer Richtung verschiebt. In dem ganz analogen Fall eines horizontal geworfenen Steines ergibt sich dagegen die Arbeit richtig nach der allgemeinen Regel.

Arbeitsleistung setzt also voraus, daß die Achse der Kraft sich verkürzt, wenn es eine Zugkraft, oder sich verlängert, wenn es eine Druckkraft ist. Beispielsweise leistet ein Arbeiter Arbeit, wenn er einen Wagen verschiebt, im einfachsten Fall gegen den Trägheitswiderstand desselben[1]. Schiebt er den Wagen einen Berg hinauf, so hat er außerdem Arbeit zu leisten gegen die Schwere und geschieht das Schieben sehr langsam, so verschwindet die Trägheit gegenüber der Schwere, man kann sagen, er leiste Arbeit nur gegen die Schwere. Andere Beispiele aus dem gewöhnlichen Leben sind: Heben einer Last; Aufziehen eines Uhrgewichtes, einer Uhrfeder; Ziehen eines Wagens durch Pferde. In jedem Falle ist:

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Weg}.$$

Einheit der Arbeit ist das Kilogrammeter oder Meterkilogramm.

Man hebe zuerst 1 kg 1 m hoch; sodann 2 kg 1 m, 2 kg 2 m; dann ein beliebiges Gewicht auf beliebige Höhe und bestimme jeweils die geleistete Arbeit. Durchschnittlich kann ein Mensch täglich 127 000 kgm Arbeit leisten.

Ebenso wie zum Heben eines Gewichtes ist Arbeit erforderlich zum Ausdehnen oder Zusammendrücken einer Feder. Die Berechnung ist aber etwas weniger einfach, insofern mit zunehmender Deformation auch die erforderliche Kraft zunimmt.

In dem gehobenen Gewicht oder der deformierten Feder ist die geleistete Arbeit gewissermaßen aufgespeichert, denn eine aufgezogene Feder vermag ebenso ein Gewicht zu heben, also Arbeit zu leisten, wie ein Arbeiter; in gleicher Weise kann durch ein gehobenes Gewicht eine Feder aufgezogen werden. Das Arbeitsvermögen eines gehobenen Gewichts nennt man Energie der Lage, das einer gespannten Feder Spannungsenergie. Beide Energieformen werden auch als potentielle Energie bezeichnet.

24. Potentielle Energie. Dehnen wir eine Spiralfeder, indem wir ein zuvor gehobenes Gewicht daran hängen, so verliert dieses potentielle Energie, während die Spiralfeder solche gewinnt. Die Energie kann also von einem Körper auf einen andern übertragen werden, wie man z. B. Wasser aus einer Flasche in eine andere gießen kann. Und ebenso wie in diesem Falle die Menge des Wassers ungeändert bleibt, bleibt auch die Menge der Energie im Falle der Übertragung durchaus dieselbe. (Gesetz der Erhaltung der Energie.)

Um die Feder bis zu dem Maße zu spannen, wie es durch das Gewicht geschieht, ist genau dieselbe Arbeit erforderlich, wie um das Gewicht wieder zu heben, bis die Feder entspannt ist. Ein gehobenes Gewicht vermag also genau dieselbe Arbeit zu leisten, die zu seiner Hebung gebraucht wurde. Demgemäß bildet diese Arbeit das Maß der in ihm aufgespeicherten potentiellen Energie. Wir können sagen: Wird ein Gewicht von p Kilogramm auf s m Höhe gehoben, so beträgt die in ihm aufgespeicherte potentielle Energie $p \times s$ Kilogrammeter.

---

[1] Man pflegt zu sagen, er leiste Arbeit am Wagen. Stößt ein bewegter Wagen gegen einen ruhenden, so wird vom Wagen Arbeit geleistet.

Von der Arbeit ist wohl zu unterscheiden die **Leistung** oder der **Effekt** [1], d. h. die pro Sekunde z. B. von einem Uhrwerk oder Federmotor geleistete Arbeit [2].

25. Feste Rolle. Trägt ein Maurer eine Last von 50 kg etwa auf einer senkrechten Leiter 30 m hoch hinauf, so könnte man meinen, die geleistete Arbeit sei 1500 kgm. Dem ist indes keineswegs so, denn er hat auch sein Körpergewicht zu heben. Ist dieses z. B. 80 kg, so ist die Gesamtarbeit 3900 kgm. Bei einem Briefträger ist die Last minimal gegen das Körpergewicht.

Ein Mittel, diesen unnötigen Arbeitsverbrauch zu vermeiden, bietet die **feste Rolle**, welche schon beim Bau der ägyptischen Pyramiden Anwendung gefunden hat. Kraft und Last sind hier gleich, wie bei direkter Hebung der Last, was man leicht bei Ausführung einer **virtuellen Verschiebung** erkennen kann. Man denke sich eine mit gleichen Gewichten belastete Schnur über die Rolle gelegt und dem System in der Richtung des einen Gewichtes einen schwachen Stoß erteilt. Nach dem Trägheitsgesetz muß es die erteilte Geschwindigkeit beibehalten, also sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit weiterbewegen. Dabei wird auf der einen Seite potentielle Energie gewonnen, auf der anderen verloren. Soll die Gesamtmenge unverändert bleiben, so ist dies, da die Wege gleich sind, nur möglich, wenn auch die Kräfte gleich sind [3]. Gleiches gilt auch für den Fall, daß die Schnur über **zwei oder mehr Rollen** geführt ist. Durch Rollen kann man also die Richtung einer Kraft beliebig ändern [4]. Es empfiehlt sich, den Satz auch unter Anwendung eines Dynamometers zu zeigen (Fig. 2068).

Die **Paternosterwerke** und **Eimerkünste**, welche ebenfalls im Altertum vielfache Verwendung fanden, sind weitere Beispiele der Anwendung der Rolle (Fig. 2069). Ebenso Naß- und Trockenbagger.

---

[1] Es empfiehlt sich hier auf den Begriff des **Effekts** hinzuweisen und denselben durch Heben von Gewichten mittels eines großen Uhrwerks oder Federmotors zu bestimmen; ferner wäre darauf aufmerksam zu machen, daß als praktische Effekt-Einheit die **Pferdekraft** = 75 kgm pro Sekunde benutzt wird. — [2] Nach **Stupin** ruft die Arbeit beim Heben von 30 kg auf 20 cm dreimal mehr Ermüdung hervor als die beim Heben von 12 kg auf 50 cm. Somit können Arbeitsgrößen, die mechanisch gleich sind, in **physiologischer** Hinsicht sehr verschieden sein. Zwei Radfahrer von gleichem Gewicht und gleicher Geschwindigkeit, aber ungleichem Übersetzungsverhältnis vom Drehkurbelrad auf die Hinterachse erzeugen mechanisch genommen denselben Effekt. Nichtsdestoweniger ist die Ermüdung des langsam tretenden Fahrers, welcher größere Kraft aufzuwenden hat, bis zu einem gewissen günstigsten Verhältnis, das von der Individualität abhängig ist, größer. — [3] Gegen die Ableitung der Wirkungsgesetze der einfachen Maschinen aus dem Gesetz der Erhaltung der Energie sind zahlreiche Einwendungen geltend gemacht worden. Man hält dieselbe insofern für unberechtigt, als das Gesetz der Erhaltung der Energie nicht als Fundamentalsatz eingeführt werden dürfe, sondern erst zu beweisen sei. Man hätte also zunächst die Elastizität zu behandeln, um das Vorhandensein einer Spannung in der Schnur zu beweisen, alsdann das nun als Axiom einzuführende Gesetz des Parallelogramms der Kräfte, um zu erklären, wie durch Zusammenwirken der Kohäsion der Rolle und der Spannung der Schnur die Änderung der Kraftrichtung zustande kommt u. s. w. Ich halte indes diesen Weg für viel zu kompliziert, abgesehen davon, daß wir die Gesetze der Molekularkräfte überhaupt nicht kennen, und bin der Meinung, daß man mit gleichem Rechte das Gesetz der Erhaltung der potentiellen Energie wie das Parallelogrammgesetz als Axiom einführen kann, wobei nicht nur die Darstellung einfacher wird, sondern auch der Begriff der Energie von vornherein möglichst klargestellt wird. Siehe Z. 11, 41, 1898 und später. — [4] Nach Anleitung von Fig. 2068 kann man sich auch mittels einer Federwage hiervon überzeugen.

Man kann auch darauf hinweisen, daß die Rolle eine genauere Eichung von Gewichten ermöglicht als die Federwage. Es genügt, wenn zwei Speichen des Rades verbleiben, d. h. wenn die Rolle durch die Wage ersetzt wird.

Was nun die Rollen selbst betrifft, so müssen dieselben leicht beweglich sein und gegen die Achse etwas stärker werden, um die Reibung an den Backen des Klobens möglichst zu mindern; auch darf die Schnur die Rolle nicht verlassen können.

Bei hölzernen Rollen (Fig. 2070) verfertigt man den Kloben aus einem Stück gebogenen Messingblechs, die Rolle wird durchbohrt und die aus einem Stücke einer Stricknadel bestehende Achse im Kloben etwas vernietet; gleiches geschieht auch, und zwar, ehe man das Blech zum Kloben biegt, mit dem Haken, dem man aber nachher ein wenig Öl gibt und ihn herumdreht, damit er beweglich werde.

Fig. 2068.

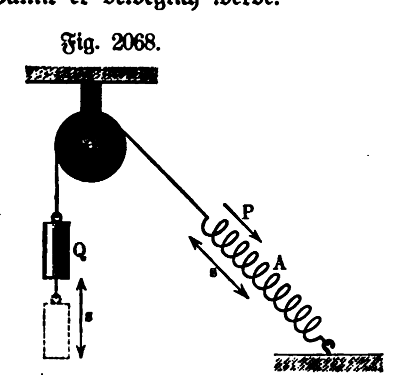


Fig. 2070.



Fig. 2071.

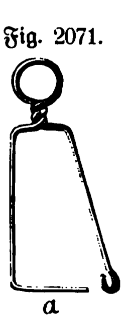
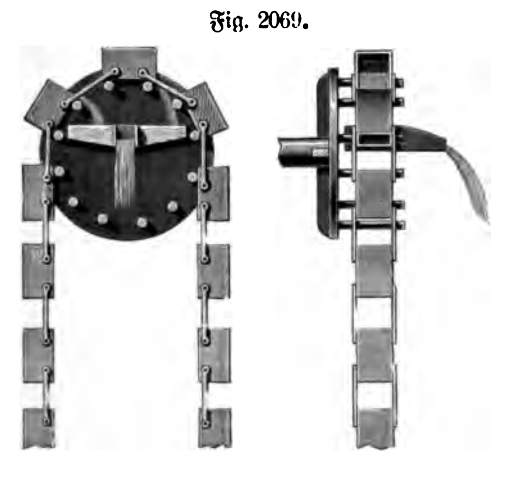


Fig 2072.



Um äußerst geringe Kosten, beinahe ohne Mühe, erhält man die erforderliche Zahl noch ziemlich leicht beweglicher Rollen, wenn man vom Dreher aus hartem Holze eine Anzahl schon durchbohrter Rollen machen läßt, einen ihrer Öffnung entsprechenden schön runden Eisendraht, wie Fig. 2071, biegt, die Rolle an *a* steckt und das Stück mit dem Öhr vollends zubiegt, damit das Stück *a* durch dasselbe hindurchreiche.

Fig. 2069.



Die Herstellung größerer leichtgehender Rollen wurde bereits oben (S. 310) besprochen.

Um den Zug hervorzubringen, kann man gewöhnliche Dynamometer, Gewichte oder Neusche Meßdrähte anwenden. Als Gewichte dienen am besten Bleikugeln von gleicher Größe, welche an diametral gegenüberliegenden Stellen mit Haken versehen sind, mittels deren sie sich zu größeren Gewichtstücken zusammenketten lassen. Der Wert eines solchen Gewichtstückes ist alsdann durch die Zahl der dasselbe zusammensetzenden Kugeln gegeben und weithin deutlich erkennbar. Benutzt man gewöhnliche Gewichte, so muß mindestens durch eine deutliche Aufschrift oder eingedrehte Rillen der Wert aus der Ferne erkennbar sein.

26. Lose Rolle. Eine scheinbare Ausnahme vom Gesetz der Erhaltung der Energie macht die Energieübertragung mittels der losen Rolle. (Fig. 2078 rechts.) Man erkennt aber bei genauerer Betrachtung leicht die sogenannte goldene Regel der Mechanik: „Was an Kraft gewonnen wird, wird an Weg verloren.“ Der mit der losen Rolle kombinierten festen kann man die Form Fig. 2072 geben.

27. Flaschenzüge. Ein noch besseres Mittel zur Demonstration dieser Regel, der einfachsten Form des Gesetzes der Erhaltung der Energie, bieten die Flaschenzüge.

Dabei wäre ebenfalls auf die Verwendung der Flaschenzüge im Altertum, namentlich durch Archimedes aufmerksam zu machen.

Da die Anordnung der Rollen bei den zu technischen Zwecken gebrauchten Flaschenzügen wenig übersichtlich ist, gebrauche ich zur Demonstration des Prinzips ein Modell, wie es Fig. 2073 zeigt.

Fig. 2073.

Fig. 2074. Fig. 2075. Fig. 2076.

Bei einem Flaschenzuge von n Rollen (Fig. 2073) ist die Last = der Anzahl der Windungen × Kraft und unabhängig von der Größe der Windungen. (Der Ausdruck Windungen ist gebraucht, um die Analogie mit Elektromagnetismus und Induktionserscheinungen hervorzuheben.)

Will oder muß man sich mit einem gewöhnlichen Flaschenzuge begnügen, so läßt man sich vom Drechsler zwei ungleiche Rollen machen und schneidet den einen Teil der Flasche aus Holz, wie in Fig. 2074 und 2075. Man legt die Rollen ein, wie die Figur zeigt, und bezeichnet die Stelle der Achse. Hier wird dann eine feine Öffnung durchgebohrt und die Flasche durch Aufnageln eines Brettchens, wie in Fig. 2076, vollendet. Als Achse dient ein mit kurzer vierkantiger Spitze versehenes Stückchen einer Stricknadel, welches durch den durchbohrten Teil und die Rolle gesteckt und anderseits eingeschlagen wird. Oben und unten schraubt man kleine Haken ein, wie man sie in jedem Eisenladen findet.

Zur Vermeidung von Zeitverlusten durch Tarieren muß an dem Schnurende ein Taragewicht (schwerer Haken, Knopf u. s. w.) fest angebracht sein, welches den losen Rollen und Schnüren des unbelasteten Flaschenzuges gerade das Gleichgewicht hält. Dasselbe muß so gestaltet sein, daß es mit den aufzulegenden Gewichten nicht verwechselt werden kann.

Flaschenzüge für größere Lasten, zum Spannen von Drahtleitungen (**Telegraphenflaschenzüge**), sogenannte Taukloben (Fig. 2077) u. s. w. sind zu beziehen von E. **Sonnenthal** in Berlin C, Neue Promenade 6.

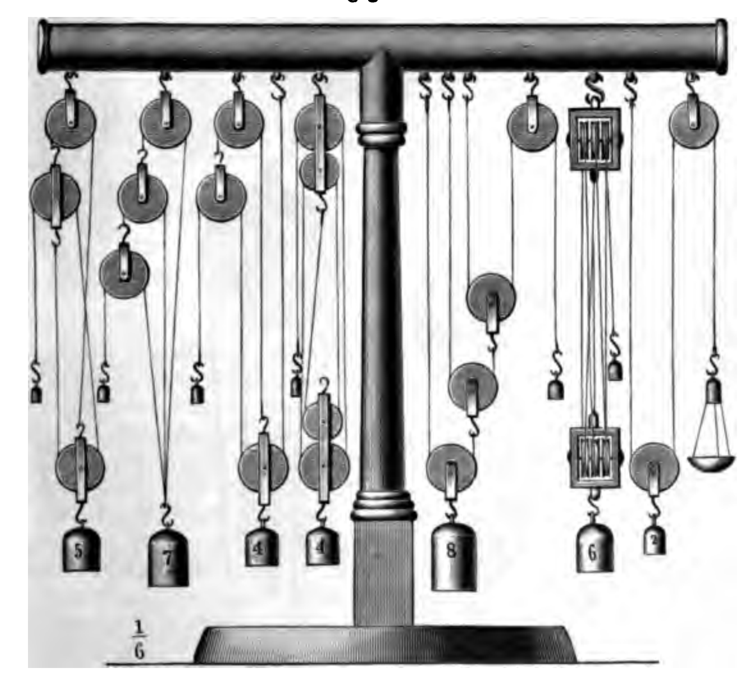
Um die Größe des Zuges darzustellen, den ein Mann mittels eines Flaschenzuges ausüben kann, benutzt man am besten einen an der Zimmerdecke befestigten Flaschenzug, an dessen Haken ein Dynamometer für 300 kg befestigt wird, welches selbst wieder durch einen langen Haken mit dem Fußboden in Verbindung steht, wo zu diesem Zweck in einer durch einen Deckel verschließbaren Grube eine kräftige Öse vorgesehen ist.

Fig. 2077.



Die Zusammenstellung von Rollen zu einem sogenannten **Potenzflaschenzug** zeigt Fig. 2078, erste Kombination rechts. **Insofern derartige Zusammenstellungen nichts prinzipiell Neues bieten, mag man sie an einem Gestell wie Fig. 2078 vereinigen, was** sonst pädagogisch verfehlt wäre, da eine solche bunte Mannigfaltigkeit das Verständnis nicht fördern kann und für den Lehrer die Erklärung erschwert. Aus diesem Grunde wird jenes Stativ **zweckmäßig nur zur Aufbewahrung benutzt und im Falle des Gebrauchs jede Kombination** einzeln etwa an einem gewöhnlichen **Bunsenschen** Stativ aufgehängt.

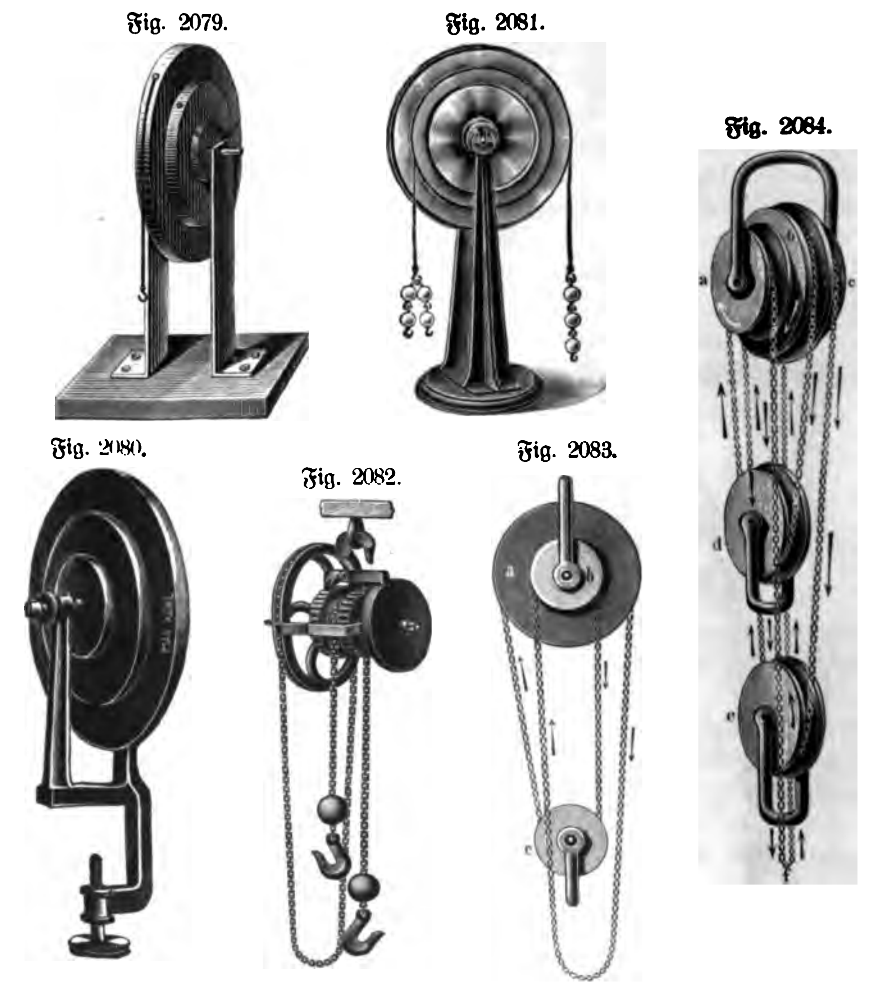
Fig. 2078.



Von anderen wird an Stelle des in Fig. 2078 abgebildeten Stativs ein auf **einem Grundbrett vertikal** befestigter rechteckiger Rahmen aus Holz vorgezogen, **dessen vertikal stehende** Stäbe geschlitzt sind und so ermöglichen, eventuell auch feste **Rollen in beliebiger Höhe** (zur Demonstration des Kräfteparallelogramms) anzubringen. **Max Kohl** liefert einen solchen zu 5 bis 8 Mk.

Ein wesentlicher Übelstand ist der, daß, wenn beim Transportieren aus der Sammlung in den Lehrsaal nicht äußerste Vorsicht angewandt wird, die einzelnen Schnüre sich beim Hin- und Herpendeln miteinander verwickeln und dann die Entwirrung oft mehr Arbeit verursacht als das Neuzusammensetzen. Benedict (1884) hat deshalb den Apparat noch mit einer zweiten Querstange am Fuße versehen, an welcher im Falle des Nichtgebrauchs die Haken der unteren Rollen und Schnurenden durch schwache Gummibändchen befestigt werden, so daß beim Transport kein Hin- und Herpendeln möglich ist.

28. **Das Rad an der Welle.** Durch ein entsprechendes Stück von hartem Holze wird eine eiserne Achse gesteckt und beide werden zusammen so abgedreht, daß


Fig. 2079. Fig. 2081. Fig. 2084. Fig. 2080. Fig. 2082. Fig. 2083.

das Holz eine Anzahl miteinander verbundener Scheiben darstellt, deren Durchmesser im Verhältnisse von 1, 2, 3 u. s. w. zueinander stehen (Fig. 2079). Jede Scheibe erhält zwei diametral einander gegenüberstehende kleine Haken zum Einhängen von Schnüren. Diese Scheibe wird von zwei gleichen messingenen Schienen, die auf ein Brettchen geschraubt sind, getragen, eventuell von einem gußeisernen Stativ.

Die Fig. 2080 und 2081 zeigen zwei andere Ausführungsformen des Wellrades (K, bezw. Lb, 10,2). Für eine größere Zuhörerzahl benutze ich ein sehr großes aber leichtes Rad, wie solche z. B. an Milchzentrifugen (zu beziehen von L. Stieger in Frankfurt a. M. zu 465 Mk.) Verwendung finden, ferner einen Handaufzug, Fig. 2082 (zu beziehen von Sonnenthal jun., Berlin, Preis 34 Mk.).

Der Differenzialflaschenzug (Fig. 2085, Lb, 18) besteht gewöhnlich, wie in Fig. 2083, nur aus zwei miteinander verbundenen festen Rollen *a*, *b* und einer beweglichen *e*, welche mit *b* gleichen Durchmesser hat; eine endlose Kette ist, wie die Figur zeigt, über alle drei geschlungen. In Fig. 2084 sind es drei miteinander verbundene feste Rollen *a*, *b*, *c* nebst zwei beweglichen *d*, *e*, wovon *a*, *c*, *d* und *e* gleichen Durchmesser haben; die endlose Kette ist, wie die Figur zeigt, über die fünf Rollen geschlungen und es geht die eine der beweglichen herunter, während die andere hinauf geht; die Schlinge bei *f* bleibt dabei unverändert [1]).

Fig. 2085.



Fig. 2086.



Die Räderwerke demonstriere ich an einem großen Turm-Uhrwerk, wobei der Windflügel durch eine Spule ersetzt ist, welche einen belasteten Faden aufwindet. (Modelle siehe S. 653 bis 657 und Fig. 2086, Lb, 130 [2]).

---

[1]) Technisch brauchbare Differentialflaschenzüge liefert Sonnenthal, Berlin C, Neue Promenade 6, zu 8 bis 100 Mk. ohne Kette, die Kette pro Fuß zu 0,4 bis 1 Mk. —

[2]) Ein Uhrwerk kann man so vorrichten, daß es ein zweites aufzieht, und das zweite könnte so eingerichtet sein, daß es beim Ablaufen das erste wieder aufzieht. Man könnte also anscheinend eine Kombination zweier Uhrwerke herstellen, von welchen immer eines das andere aufzieht, d. h. eine Maschine, welche sich für ewige Zeiten von selbst in Bewegung hält, ein Perpetuum mobile. Ein solches Räderwerk, welches immerfort weiterläuft, ohne Wartung zu beanspruchen, wäre selbstverständlich für zahllose Zwecke von größtem Nutzen, und man hat deshalb auch in früheren Zeiten unzählige Kombinationen von Mechanismen zu diesem Zwecke ersonnen und geprüft, indes ohne den mindesten Erfolg. Das Ergebnis aller dieser Bemühungen war der Fundamentalsatz der heutigen Physik: „Ein Perpetuum mobile ist unmöglich".

Soll nämlich das wechselseitige Aufziehen des einen Uhrwerkes durch das andere möglich sein, so muß die Kraft, mit welcher das erste auf das zweite wirkt, ebenso groß sein wie diejenige, mit welcher dieses an derselben Stelle das erste beeinflußt. Da ferner die Kräfte nur durch Berührung wirken können, muß auch der Weg des Angriffspunktes der einen Kraft ebenso groß sein, wie der der andern, somit auch das Produkt von Kraft und Weg oder die Arbeit.

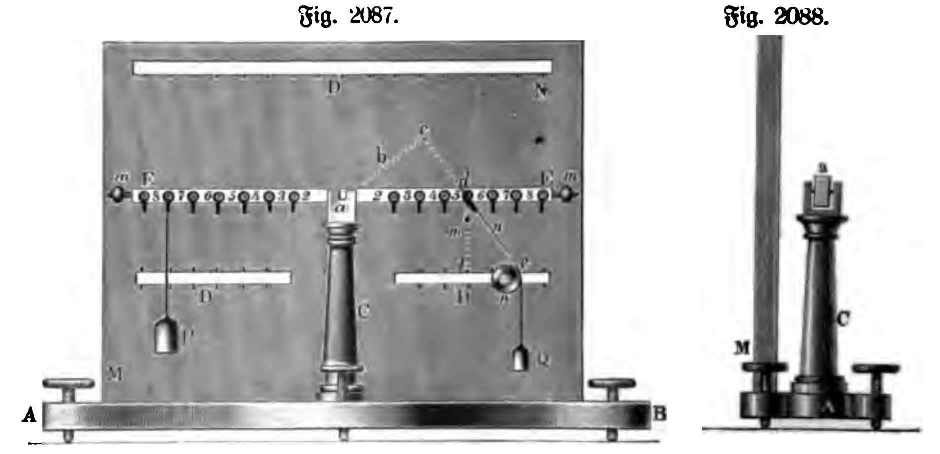
Infolge der Gleichheit der Kräfte kann allerdings Bewegung von selbst nicht ein-

29. **Der Hebel.** Aus dem Wellrad erhält man einen Hebel, wenn man von Rad und Welle nur eine Speiche beibehält. Um die Gesetze des Hebels zu zeigen, muß man sich beim Unterrichte keine Zeit reuen lassen und dieselben in den mannigfaltigsten Anwendungen verfolgen; so einfach sie auch zu sein scheinen, so findet man doch ziemliche Schwierigkeit, bis die Schüler den Hebel in jeder seiner Anwendungen wieder erkennen und seine Wirkung zu schätzen und zu berechnen wissen. Die Zeit aber, die man auf die Erörterung und Einübung solcher Fundamentalgesetze verwendet, ist wohl die am besten verwendete.

Ich benutze zunächst einen sehr langen Hebel aus Stahl mit drei Haken versehen, zwei an den Enden, einer etwa ein Fünftel der Länge von einem Ende entfernt. Die Stange ist verjüngt geschmiedet, so daß der Hebel am mittleren Haken aufgehängt für sich im Gleichgewicht ist.

Der Apparat, Fig. 2087 und 2088 ist ganz gut geeignet zur Darstellung der Gesetze des Hebels für den Fall, daß mehr als zwei Kräfte tätig sind. Er ist durchaus, einige kleinere Stücke ausgenommen, aus hartem Holze gefertigt. Auf dem

Fig. 2087. Fig. 2088.



mit Stellschrauben versehenen Grundbrette AB steht senkrecht das Brett MN und vor ihm in der Mitte die Säule C. Das Brett MN hat drei Schlitze DDD, um darin Rollen befestigen zu können. Auf die Säule C ist der aus Messingblech gebogene Bügel a mittels Holzschrauben befestigt; er hat in seinen Backen einen

treten, es ist zunächst Gleichgewicht vorhanden. Durch einen äußeren Anstoß kann aber bewirkt werden, daß Bewegung erfolgt.

Man könnte sich nun vorstellen, daß diese Bewegung immerfort andauern würde, falls durch einen geeigneten Mechanismus dafür gesorgt wäre, daß sie jeweils nach Ablaufen eines Uhrwerkes ihre Richtung umkehrt. Es würde dann das Gewicht der ersten Uhr beim Heruntersinken die Arbeit $p \cdot s$ Kilogrammmeter leisten, da sein Gewicht p Kilogramm und die Fallhöhe s Meter beträgt. Ebenso groß muß aber, wie gezeigt, die im zweiten Uhrwerk gewonnene Energie sein, d. h. das erste Uhrwerk überträgt an das zweite genau denselben Betrag an Energie, den es ursprünglich selbst erhalten hatte. Damit ist sein Energievorrat erschöpft, es hat seine ganze Energie wieder verloren, und zur Überwindung der unvermeidlichen Reibungswiderstände bleibt nichts übrig. Wären solche Reibungswiderstände nicht vorhanden, so würde allerdings ein kleiner Anstoß genügen, das System für immer in Bewegung zu halten, und weil die bei jeder kleinen Verschiebung verlorene und gewonnene potentielle Energie einander genau gleich sind, würde der gesamte Energievorrat stets ungeändert erhalten bleiben.

Einschnitt, um die Achse des Hebels aufzunehmen. Der Hebel selbst ist ein vierkantiger hölzerner Stab, durch dessen Mitte, genau senkrecht zu seiner Länge, eine stählerne Achse durchgetrieben ist; ein Stück einer guten Stricknadel taugt hierzu sehr wohl, wenn man seine Enden etwas konisch zuschleift und ein kleines Loch im Hebel vorbohrt. Die Achse wird etwas weniges über dem Schwerpunkte durchgetrieben. In gleichen Abständen (von 1 bis 3 cm) werden nun auf gleiche Weise etwas dünnere Stifte möglichst genau durch die Achse des Stabes und senkrecht zu ihr durchgeschlagen, und in jeden derselben ein Bügel, wie Fig. 2089, aus Messingdraht gehängt; man verfertigt diese Bügel aus gleich langen Stücken von hartgezogenem Drahte, damit sie etwas federn und allenfalls auch abgenommen und mit der Biegung nach oben eingehängt werden können. Die Aufhängepunkte werden von der Mitte aus numeriert. An seinen beiden Enden trägt der Hebel kurze Schrauben mit feinem Gewinde, auf denen sich die beiden metallenen Kugeln *mm* hin und her schrauben lassen, um das Gleichgewicht um so leichter herstellen zu können.

Andere Formen von Hebelmodellen zeigen die Fig. 2090, 2091 (Lb, 18 bis 24) und 2092 (K, 12).

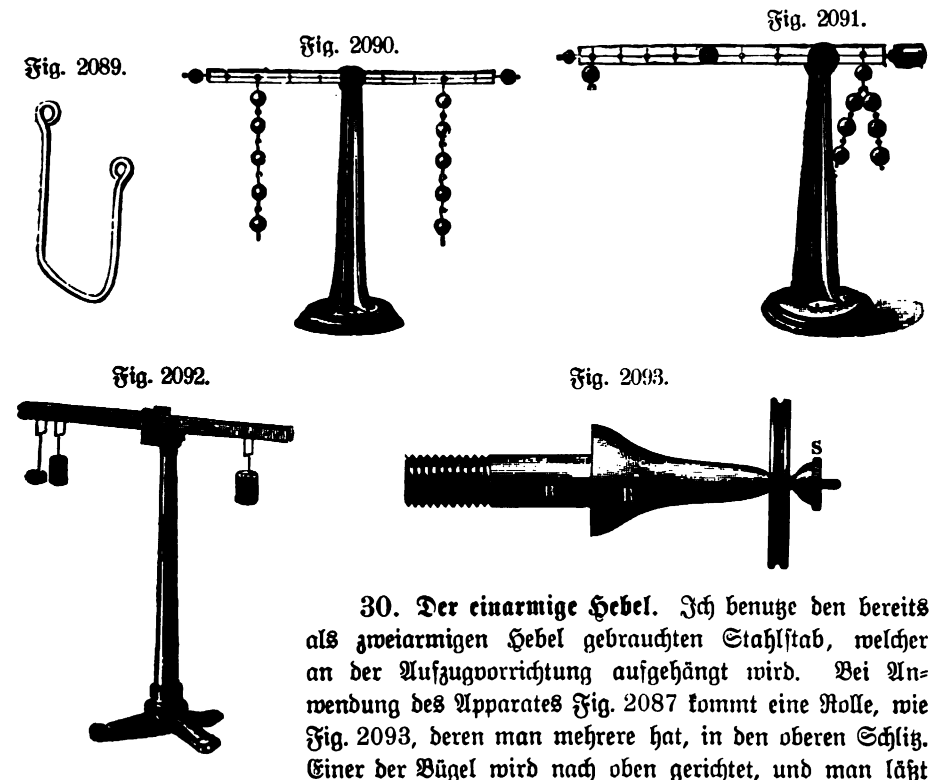


Fig. 2089. Fig. 2090. Fig. 2091. Fig. 2092. Fig. 2093.

30. Der einarmige Hebel. Ich benutze den bereits als zweiarmigen Hebel gebrauchten Stahlstab, welcher an der Aufzugvorrichtung aufgehängt wird. Bei Anwendung des Apparates Fig. 2087 kommt eine Rolle, wie Fig. 2093, deren man mehrere hat, in den oberen Schlitz. Einer der Bügel wird nach oben gerichtet, und man läßt nun das daran befestigte Gewicht über die Rolle wirken und das zweite in der erforderlichen Entfernung direkt. Um die Stellung der oberen Rolle für den Zweck hinlänglich genau machen zu können, hat auch der obere Schlitz eine mit jener des Hebels zusammenfallende Teilung.

Viel einfacher ist die Vorrichtung in Fig. 2094, wo sich der Hebel *AB* nur um einen Stahldraht dreht, und die Bügel der Gewichte ebenfalls nur durch einen in die Öffnung des Hebels gesteckten Draht da angebracht werden, wo man sie braucht.

Fig. 2094.

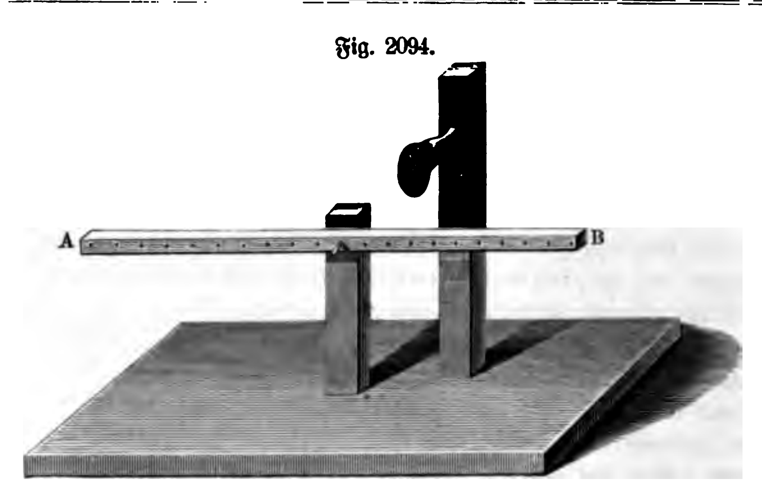


Fig. 2095.

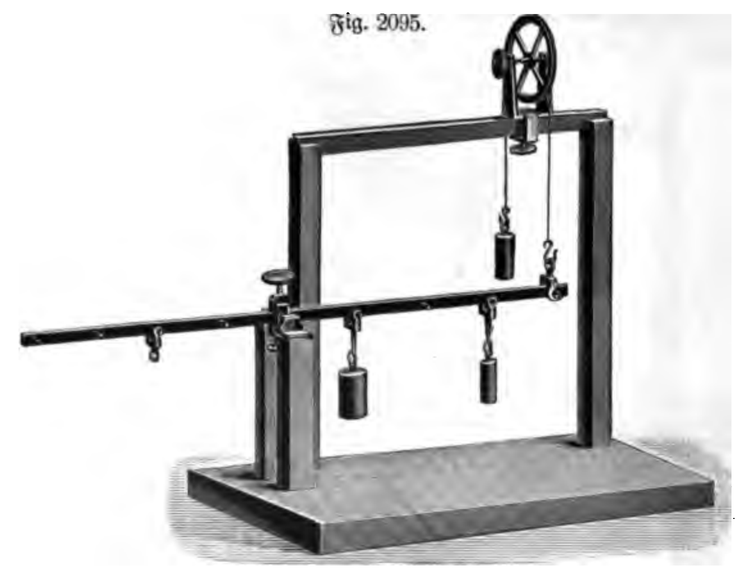
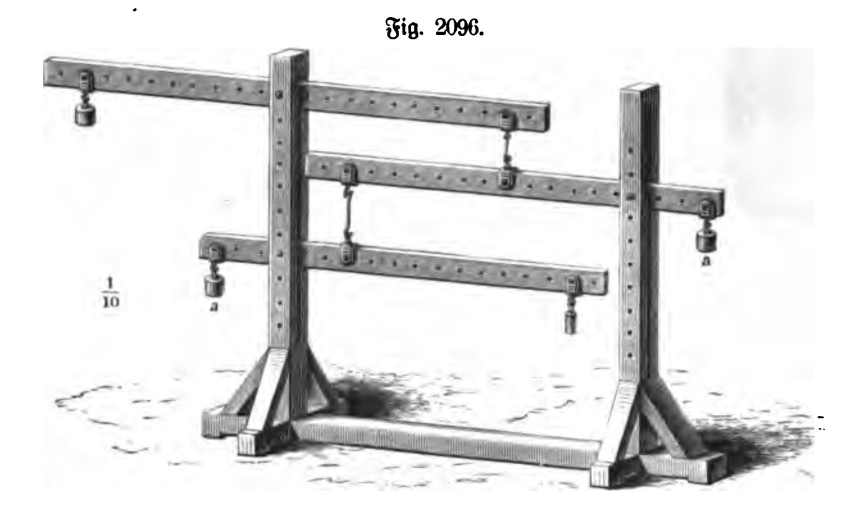


Fig. 2096.



Eine vollkommenere Einrichtung zeigt Fig. 2095 (E, 40).

Als Beispiele der praktischen Verwertung des einarmigen Hebels kann man Brecheisen, Nußknacker u. s. w. demonstrieren; ferner die Sperrvorrichtungen Fig. 2034 (E, 54) und 2035 (E, 70), S. 649.

31. **Zusammengesetzte Hebel.** Eine einfachere und sehr brauchbare Vorrichtung zeigt Fig. 2096. Ihre Einrichtung bedarf keiner weiteren Beschreibung. Jeder der Hebel kann für sich gebraucht oder mit den anderen auf irgend eine Weise verbunden werden. In den Hebeln und im Gestelle sind nur glatte Löcher gebohrt und glatte Drahtstücke dienen als Achsen und zum Aufhängen der Gewichte mittels kleiner messingener Bügel, welche Haken tragen; die Verbindung der Hebel unter sich geschieht durch Drahthaken. Für den Fall, daß sie als einarmige Hebel gebraucht werden sollen, werden sie durch Gegengewichte (*a a*) vorher ins Gleichgewicht gebracht. (W, 15.)

32. **Winkelhebel.** Ich benutze als solchen einen hölzernen Winkel von großen Dimensionen. Emsmann empfiehlt den Apparat Fig. 2097. Von den beiden

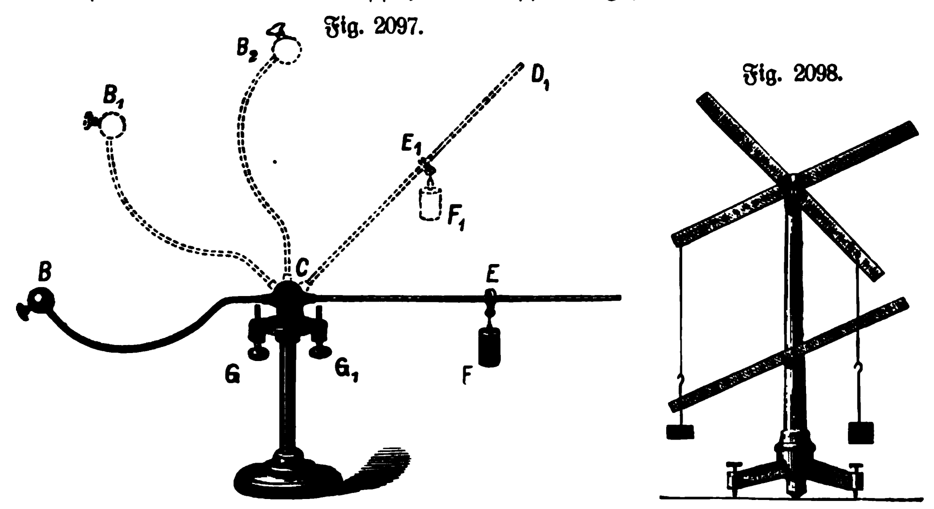


Fig. 2097. Fig. 2098.

Armen ist der eine gebogen, der andere gerade, beide sind mit Laufgewichten *B* und *F* versehen und lassen sich nach Art der Arme eines Zirkels unter beliebigen Winkeln gegeneinander verstellen. Damit der Hebel nicht umkippe, sind die Arretierungen *G* und G_1 angebracht.

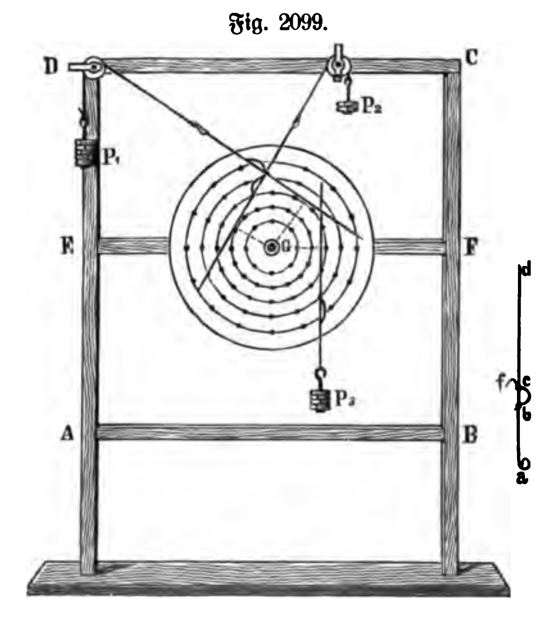
Einen anderen Apparat zu gleichem Zwecke zeigt Fig. 2098 (K, 27).

33. **Drehungsmoment.** Handl (1885) benutzt den in Fig. 2099 dargestellten Apparat zum Nachweise folgender Sätze:

a) „**Zwei Kräfte,** mögen sie gleichsinnig oder entgegengesetzt, parallel oder unter **beliebigem Winkel** gegeneinander geneigt sein, halten sich Gleichgewicht, wenn ihre **Drehungsmomente in** bezug auf den Drehpunkt einander gleich und entgegengesetzt **gerichtet sind.**" b) „Der Angriffspunkt einer jeden Kraft kann dabei an einen **beliebigen Ort ihrer Richtung** verlegt werden." c) „Beliebig viele Kräfte von beliebigen **Richtungen stehen im** Gleichgewichte, wenn die algebraische Summe ihrer Drehungs**momente gleich** 0 ist."

Den Hauptteil des Apparates bildet der zu bewegende Körper, eine Blechscheibe von 14 cm Halbmesser, welche mit fünf kreisförmig angeordneten Löcherreihen von 4, 6, 8, 10 und 12 cm Radius versehen ist. Durch einen als Drehachse dienenden Metallstift *G* ist sie an der horizontalen Querleiste *EF* des viereckigen Rahmens *ABCD* befestigt. Die Haken, welche in die Löcher eingreifen, haben die in der Figur rechts abgebildete Gestalt. Die Abmessungen sind: $ab = 8$, $bc = 2$, $cd = 15$ cm. Die Häkchen bei *f* dienen zum Einhängen der Drähte in die Löcher der Scheibe, die Schleifen *bc* als Handhaben zum leichten Anfassen der Drähte, die Ringe bei *a* zum Anbringen je einer dünnen Schnur, welche über eine Rolle geführt und am anderen Ende mit einem passenden Gewichtstücke *P* belastet wird. Die Rollen sind mittels kleiner Schraubzwingen an jeder Stelle des vierkantigen Rahmens zu befestigen; die Achse *G* ist so lang, daß die Schnüre der Scheibe parallel laufen. (E, 36[1]).

Fig. 2099.



Will man bei dem Apparat Fig. 2087 Kräfte schief auf den Hebel wirken lassen, so setzt man in einen oder beide untere Schlitze *DD* eine Rolle *n*, läßt nun das an einem beliebigen Bügel befestigte Gewicht *Q* wirken und kann durch direkte Messung der Entfernung *ac* die Richtung *dc* finden, in welcher nun dieses Gewicht auf den Hebel wirkt. *ac* ist nicht bequem zu messen; ist aber der obere Rand des Schlitzes *D* um eine ganze Anzahl der Abstände, welche die Stifte am Hebel haben, von der Mitte des Hebels in seiner Gleichgewichtslage entfernt, wie in der Fig. 2087 um drei solche Abstände, und mit einer Teilung versehen, welche mit der Teilung des Hebels zusammenfällt, so sind die Dreiecke *acd* und *def* ähnlich und man kann aus *df*, *de* und *ad* die Entfernung *ac* finden; *de* ist bequem zu messen. Für den gezeichneten Fall wäre $df = 3$, $ad = 5$, $de = 3^1/_2$, also $ac = b = \frac{ad \times df}{de} = \frac{30}{7}$. Wollte man nun links in der Entfernung 7 ein direkt wirkendes Gewicht anbringen, so wäre die Entfernung $\frac{49}{7}$ und die Gewichte müßten sich verkehrt wie die Entfernungen, d. h. $Q : P = 49 : 30$, verhalten.

34. **Auflagedruck des Hebels.** Bei dem Apparat Fig. 2087 kann man auch die Achse des Hebels selbst in einen solchen Bügel hängen und der Wirkung der beiden Seitenkräfte durch eine Mittelkraft, statt durch eine unveränderlich feste Unter-

---

[1]) Ähnliche Apparate nach Hartl liefert der Mechaniker Antusch in Reichenberg. (Siehe Z. 14, 321, 1901.) Über die Ableitung des Hebelgesetzes nach Grimsehl siehe Keferstein, Z. 16, 268, 1903.

stützung, das Gleichgewicht halten, um so nachzuweisen, was die Unterstützung bei *a* eigentlich zu leisten hat; dasselbe kann mittels der Apparate Fig. 2100 (Lb, 50) und 2101 (K, 50) gezeigt werden. Der Druck ergibt sich theoretisch sehr einfach aus dem Prinzip der Erhaltung der Energie, wenn man das System eine virtuelle Verschiebung ausführen läßt.

Neu benutzt die S. 663 beschriebenen Meßdrähte, wodurch Rollen u. s. w. unnötig werden und sehr rasch relativ genaue Messungen zu erzielen sind. Der Apparat (ich folge hier seiner eigenen Beschreibung) besteht aus einer Bank auf drei niedrigen

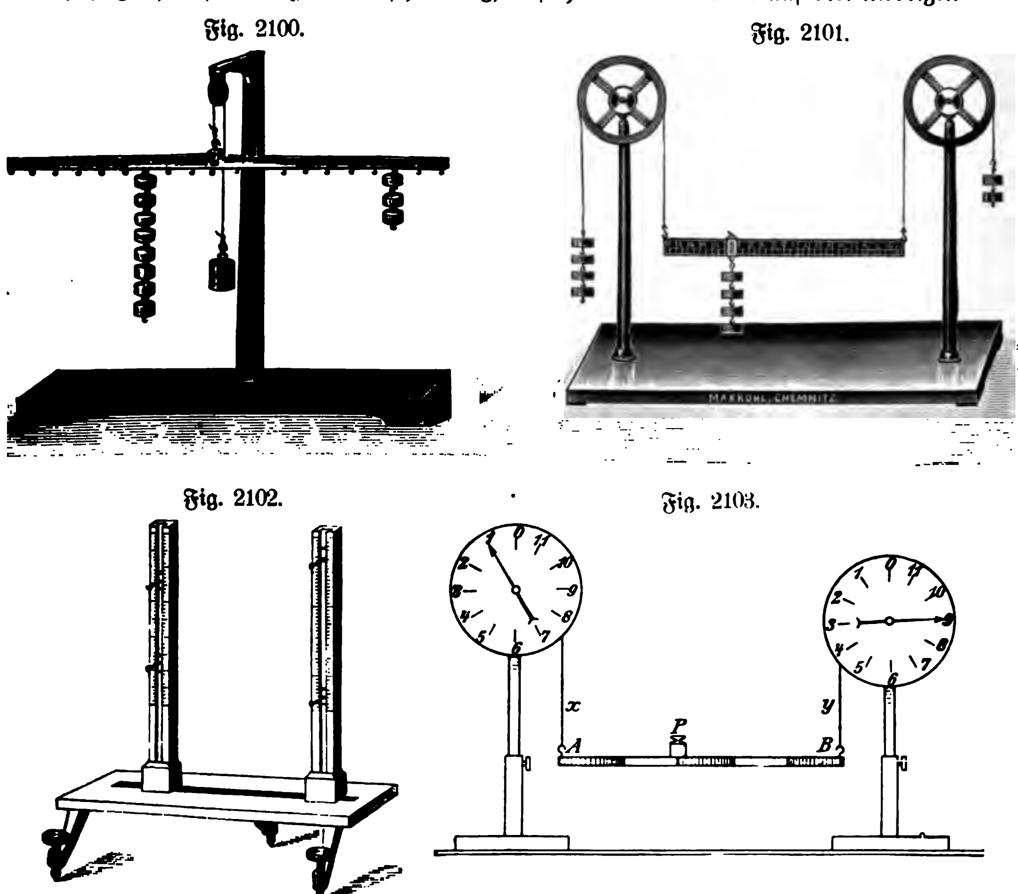


Fig. 2100. Fig. 2101.

Fig. 2102. Fig. 2103.

Füßen mit Stellschrauben, Fig. 2102, welche mit einem etwa 50 cm langen Schlitz versehen ist und aus zwei etwa 70 cm hohen Säulen, welche längs des Schlitzes in beliebiger Entfernung voneinander vertikal festgestellt werden können. Als Hebel dient im einfachsten Falle eine gerade 50 cm lange, 2 cm hohe und 1 cm breite Holzschiene. Die beiden breiten und eine der beiden schmalen Seitenflächen sind von der Mitte aus nach den Enden zu korrespondierend in Centimeter geteilt. In den Schnittpunkten der Teilstriche mit den durch Rinnen angedeuteten Mittellinien jener Seitenflächen sind schwache konische Vertiefungen eingepaßt, welche die Angriffspunkte der Kräfte repräsentieren. An jedem der beiden Meßdrähte wird eine federnde Klammer angebracht; die Öse der Klammer wird zu diesem Zwecke einfach in den einen der geschlitzten Ringe des Meßdrahtes eingeschoben. Diese Klammern

werden mit ihren konischen Zapfen in ein beliebiges Paar korrespondierender Vertiefungen der breiten Seitenflächen des Hebels eingesetzt und durch Verschiebungen des Spannringes befestigt. Der Hebel ist dann um die Zapfen jeder Klammer hinreichend leicht drehbar. Die Last, bestehend in einem passenden Gewicht, wird mittels eines S-förmigen Hakens in einem Punkte der oberen, ebenfalls geteilten Hebelfläche angehängt, indem man die stumpfe Spitze des Hakens in die oben erwähnte Rinne der oberen Hebelfläche einsetzt.

Kleiber (Z. 17, 143, 1904) verwendet die von ihm konstruierte Federwage nach Anleitung von Fig. 2103.

35. Schwerpunkt. Ersetzt man das eine Gewicht beim vorigen Versuch durch einen zweiten mit Gewichten belasteten Hebel, so erhält man ein System von drei Körpern, welche in ihrem Schwerpunkt unterstützt sind u. s. w.

Hieran anschließend erläutert man, wie der Schwerpunkt eines Dreiecks durch Konstruktion gefunden werden kann. Zur Verifizierung des Resultats kann man aus sehr gleichförmigem Holze — am besten Mahagoni- oder Ebenholz — ein etwa 1 bis 2 mm dickes Dreieck machen lassen und den Schwerpunkt darauf konstruieren; wenn man dasselbe dann von der entgegengesetzten Seite, wie in Fig. 2104, bis über die Mitte weit anbohrt und im Schwerpunkte selbst mit einer feinen Nadel vollends durchsticht, so kann man es an einem

Fig. 2104.

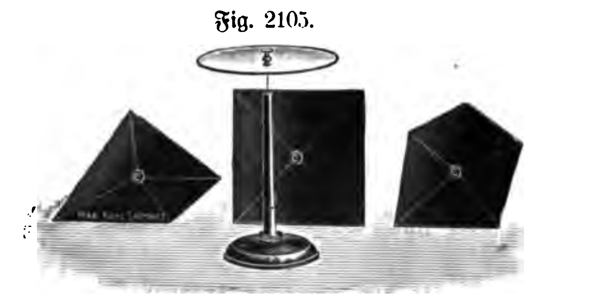


Fig. 2105.

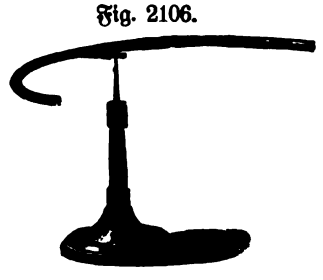


Fig. 2106.

Faden aufhängen, und es wird so nahe im Gleichgewicht sein, daß mit wenig Wachs leicht vollends nachgeholfen werden kann. Man muß nur darauf sehen, daß der Schreiner das Brett schön gleich dick macht. Ebenso kann man an einem Viereck oder Fünfeck verfahren, indem man die Flächen der einzelnen Dreiecke als die in ihren Schwerpunkten angebrachten Gewichte nimmt, durch Rechnung die gemeinschaftlichen Schwerpunkte von zweien sucht und diesen mit einem folgenden Dreiecksschwerpunkte verbindet.

Um den Schwerpunkt eines beliebig gestalteten scheibenförmigen Körpers aufzufinden, schneidet man ein Stück Pappe von unregelmäßiger Form und nicht zu kleinen Dimensionen aus, und hängt es mittels eines Fadens nacheinander an zwei verschiedenen Punkten des Umfanges auf, wobei man jeweils mit Kreide die Verlängerung des Fadens (eventuell nach einem Lot) auf die Scheibe aufzeichnet. Da wo sich die beiden Kreidestriche treffen, liegt der Schwerpunkt [1]).

[1]) Man kann bei dieser Gelegenheit darauf aufmerksam machen, daß die Bestimmung des Schwerpunktes auch auf ganz anderen Gebieten von Wichtigkeit sein kann. Stellt man z. B. auf einem leichten Stadtplan den Konsum irgend einer Ware u. s. w. an den

Bequemer als das Aufhängen ist das Aufsetzen auf eine Spitze (Fig. 2105, K, 15). Bei einem **Kreisbogen** befindet sich der Schwerpunkt außerhalb der Masse (Fig. 2106 Lb, 15,50; 2107 und 2108, Lb, 9,50).

36. Gleichgewicht. Daß der Schwerpunkt das Bestreben hat, senkrecht unter den Unterstützungspunkt zu kommen, kann mit dem **Senkblei** oder **Lot** gezeigt werden (Fig. 2109 E, 1,75 und 2110 Lb, 5); ferner mit einer **auf einem konkaven Blech rollenden Kugel**, welche sich stets nach der tiefsten Stelle begibt.

Zur Demonstration des **stabilen, labilen** und **indifferenten** Gleichgewichts kann man eine **runde** oder **elliptische Holzscheibe** benutzen, durch welche querdurch eine Achse gesteckt werden kann, und zwar entweder in der Mitte oder exzentrisch. Für das labile Gleichgewicht ist es zweckmäßig, wenn die durch die Scheibe gesteckte Achse sich an den Lagern etwas reibt.

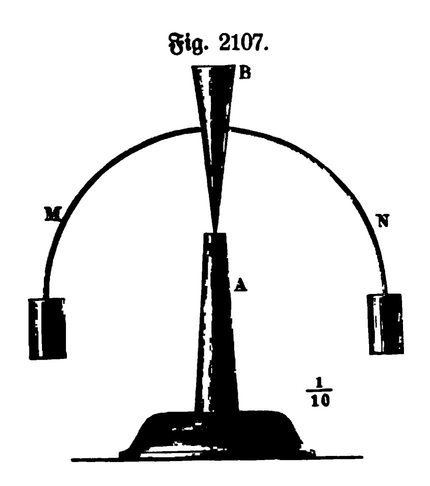


Fig. 2107.

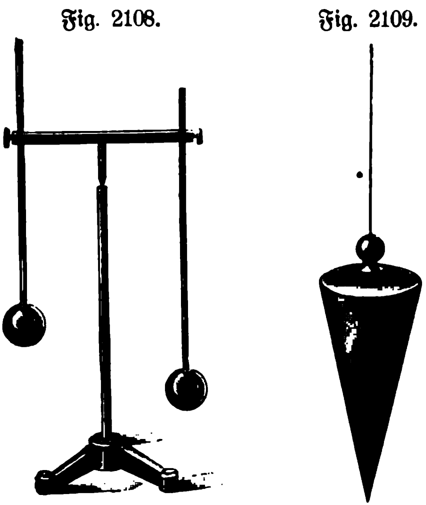


Fig. 2108. Fig. 2109.

Ist die Masse ungleichmäßig verteilt, so täuscht man sich häufig über die Lage des Schwerpunkts und wundert sich, daß das Gleichgewicht stabil ist, während man es für labil halten möchte und umgekehrt.

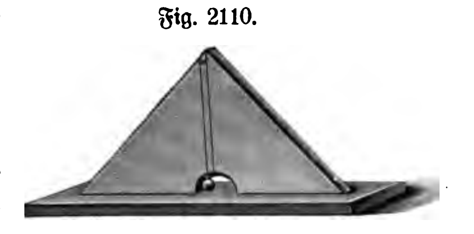


Fig. 2110.

Hierher gehört der **balanzierende Seiltänzer** (Fig. 2111 K, 16,50). Damit die Täuschung eintrete, muß die Puppe im Verhältnis zu den beiden Kugeln sehr groß, also aus leichtem Stoff hergestellt und innen hohl sein. Häufig findet man Apparate, bei welchen hierauf keine Rücksicht genommen ist und die deshalb nicht geeignet sind, die Täuschung hervorzurufen.

Auch das bekannte Kunststück, eine in einen Kork mit eingesteckten Gabeln eingeklemmte **Münze** mit der Kante auf der Spitze einer vertikal stehenden Stricknadel ins Gleichgewicht zu bringen, beruht auf gleichem Prinzip.

einzelnen Stellen durch aufgeklebte schwere Pappdeckelstücke dar, z. B. den Verbrauch an Nahrungsmitteln, Kanalisation, Gas, Wasser, Elektrizität u. s. w., so ist der Schwerpunkt der Schwerpunkt des Verbrauchs. Dort würde also am zweckmäßigsten eine Markthalle, Gaswerk, Wasserwerk, Elektrizitätswerk u. s. w. erbaut oder, wenn nicht dort möglich, wenigstens in tunlichster Nähe dieser Stelle.

Sehr instruktiv ist der in Fig. 2112 hergestellte Apparat von **Bock** (1885) zur Demonstration der verschiedenen Lage des Schwerpunktes, je nachdem die Teile des Systems fest oder lose miteinander verbunden sind (E, 15).

„Ein massiver Balken AB ist fest mit einem Kegel verbunden, dessen Spitze C nach unten gerichtet ist. In gleichen Abständen von der Mitte dieses Balkens hängen in a und a' zwei gleich schwere Pendel, aus einem festen Stabe und einer schweren Kugel bestehend, welche in b und b' an den Balken AB fest angeklemmt werden können. Der Schwerpunkt des Balkens AB mitsamt dem Kegel liege in S, der Schwerpunkt des einen Pendels in D, des anderen in D', so ist, wenn die beiden Pendel in b und b' festgeklemmt sind, der gemeinsame Schwerpunkt der beiden Pendel M die Mitte von DE, der Schwerpunkt des ganzen Systems liegt auf CM, und wenn die Pendel genügend schwer und lang sind, unterhalb C; es sei S der Schwerpunkt, so kann der Apparat, in C unterstützt, auf der Spitze schweben, weil

Fig. 2111.

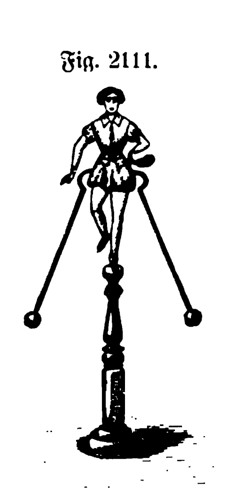
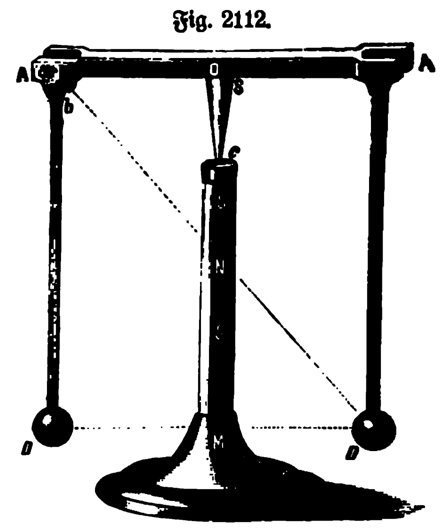


Fig. 2112.



er stabile Gleichgewichtslage hat; wird die Schraube bei b' gelockert, so daß das Pendel D' um a' schwingen kann, so rückt die Masse D' nach a' und der gemeinsame Schwerpunkt der beiden Pendel liegt in N, der Mitte von Da', der Schwerpunkt des ganzen Systems in S_2 und es behält der Apparat dieselbe Ruhelage wie vorher, wenn S_2 noch unterhalb C liegt. Wird nun aber auch die Schraube bei b gelockert, so daß auch das Pendel D um a schwingen kann, so rückt die Masse des Pendels D nach a und der gemeinschaftliche Schwerpunkt der beiden Pendel ist C, die Mitte von aa', der Schwerpunkt des ganzen Systems liegt auf OS, näher an O, also oberhalb des Unterstützungspunktes C, die Gleichgewichtslage wird labil und der Apparat wird entweder von selbst umfallen, oder, wenn er zufällig balanziert, bei der geringsten Störung seiner Gleichgewichtslage seine bisherige Lage verlassen. Der Apparat funktioniert selbst in unvollkommener Ausführung sehr schön und überrascht durch seine Wirkung."

Ein auffallendes Experiment über den Schwerpunkt, welches keine besonderen Apparate erfordert, ist das Aufhängen eines mit Wasser gefüllten Eimers an einem auf einem Tische liegenden Stock. Es genügt, daß man durch einen schräg angebrachten Stab, welcher sich einerseits gegen eine Kerbe am freien Ende des

horizontalen Stabes stützt, anderseits gegen den Boden des Eimers, so daß dieser eine schiefe Stellung annimmt, bewirkt, daß der Schwerpunkt des Ganzen unter die Tischfläche zu liegen kommt. Statt des Eimers kann man auch ein schweres Gewicht mittels einer Schnur an einen Stab anhängen und ebenso durch eine leichte Strebe soweit aus der Lotlinie durch den Aufhängepunkt entfernen, daß dasselbe unter die unterstützende Tischfläche zu hängen kommt.

Ein bekanntes aber ganz lehrreiches Spielzeug ist das Stehaufmännchen. In einfachster Weise kann man ein solches dadurch herstellen, daß man eine Halbkugel aus Blei an einen Korkstöpsel von gleichem Durchmesser mit Siegellack ankittet. Legt man den Stöpsel auf den Tisch, so steht er von selbst wieder auf.


Fig. 2113.

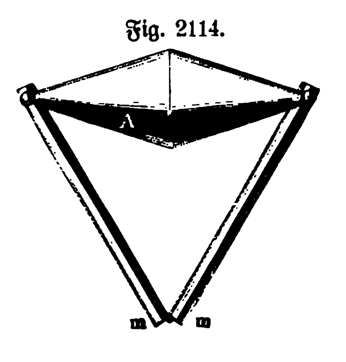
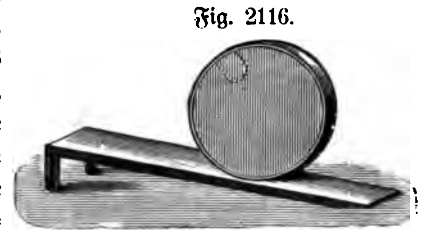


Fig. 2114.

Hübsche Spielzeuge nach diesem Prinzip liefert das Eisenwerk Gaggenau (bei Rastatt in Baden), übrigens auch jede Spielwarenhandlung. (Fig. 2113.)



Fig. 2115.

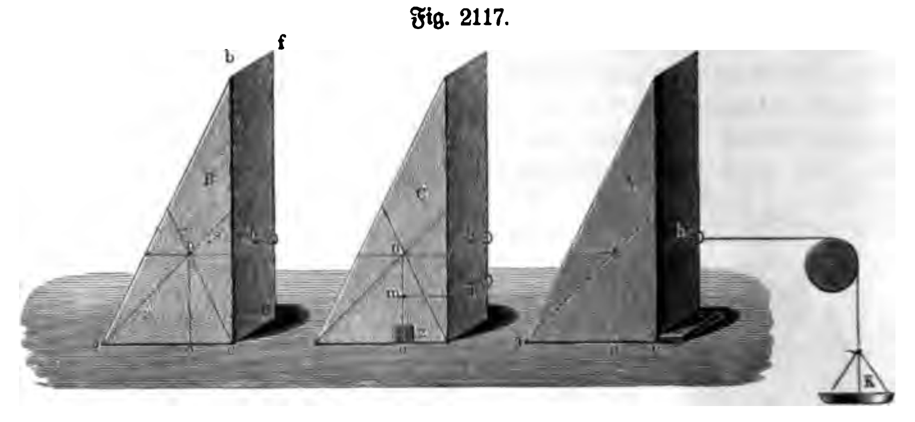

Fig. 2116.

Der Kegel, welcher bergan läuft. Man läßt sich einen Doppelkegel, Fig. 2114, drehen, von 15 bis 30 cm Länge und 6 bis 10 cm Dicke, der an beiden Spitzen Köpfe hat. Zu diesem werden zwei Brettchen gerichtet, wie *mnop*, Fig. 2115, deren obere Kanten *mn* zugeschärft sind und gegen *op* eine solche Neigung haben, daß die Achse des Doppelkegels, wenn er bei seinen Köpfen auf den höchsten Teil, bei *n*, Fig. 2115, gelegt wird, noch etwas tiefer liegt, als wenn man die gemeinschaftliche Basis auf den niedrigsten Punkt bei *m* auflegt. Beide Brettchen werden bei *m* durch ein Gelenkband verbunden und so auseinander gestellt, daß die Spitzen des Doppelkegels in dem Ausschnitte bei *n* liegen können. Setzt man dann den Kegel bei *m* auf, so läuft er nach *n* und kommt in dem Ausschnitte zur Ruhe. Man kann auch an die innere Wand eines hohlen Cylinders von Pappe mittels Papierstreifen ein Stück Blei befestigen, um eine ähnliche Erscheinung zu erhalten (W, 4 bis 5).

Berganlaufender Cylinder. An der Peripherie desselben ist ein Bleigewicht eingelassen. Wird derselbe auf eine schiefe Ebene aufgesetzt, so daß das Gewicht auf höchstem Punkte ist auf Seite der steigenden Fläche, so rollt er eine kurze Strecke hinauf (Fig. 2116, Lb, 6,50).

37. Standfestigkeit. Im einfachsten Falle benutzt man einen keilförmigen Holzkörper, wie Fig. 2117 Lb, 33 zeigt. Noch einfacher demonstriert man an einem passend zugeschnittenen, verhältnismäßig langen Holzklotz, bei welcher Neigung er zu fallen beginnt, wenn durch ein eingestecktes Bleistück der Schwerpunkt in

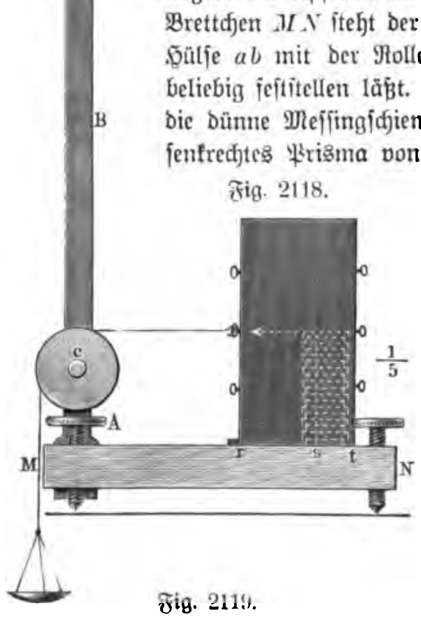
Fig. 2117.

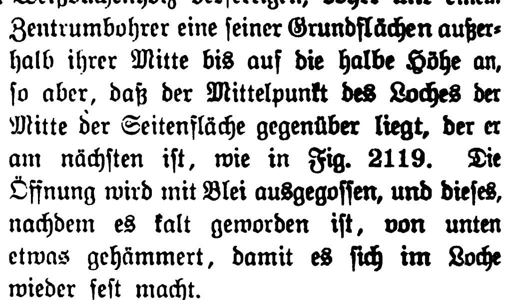


verschiedene Höhe gebracht oder durch ein angesetztes Brett die Basis verbreitert oder schief gemacht wird.

Zu eingehenderen Versuchen kann der in Fig. 2118 und 2119 abgebildete Apparat dienen. Auf dem mit Stellschrauben versehenen Brettchen MN steht der vierkantige Eisenstab B, an welchem sich die Hülse ab mit der Rolle c verschieben und durch die Druckschraube d beliebig feststellen läßt. In der Mitte, quer über dem Brettchen, ist die dünne Messingschiene mm befestigt. Man läßt nun ein genau senkrechtes Prisma von Weißbuchenholz verfertigen, bohrt mit einem

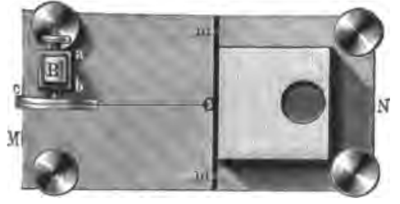
Fig. 2118.




Zentrumbohrer eine seiner Grundflächen außerhalb ihrer Mitte bis auf die halbe Höhe an, so aber, daß der Mittelpunkt des Loches der Mitte der Seitenfläche gegenüber liegt, der er am nächsten ist, wie in Fig. 2119. Die Öffnung wird mit Blei ausgegossen, und dieses, nachdem es kalt geworden ist, von unten etwas gehämmert, damit es sich im Loche wieder fest macht.

Man bestimmt nun durch Auflegen auf die scharfe Kante eines Lineals die Lage des Schwerpunktes dieses Körpers. Wenn man ein in der Textur gleichförmiges Holz ausgewählt und das Loch für das Blei genau auf die Mitte jener Seite gebohrt hat, der es am nächsten liegt, so wird auch der Schwerpunkt in dem durch diese Mitte gehenden senkrechten Schnitte liegen. Die Mittellinie dieser und der ihr parallelen Seite wird nun in vier Teile geteilt und auf jeden Teilpunkt ein Häkchen eingeschlagen, an welches eine

Fig. 2119.



über die Rolle laufende Schnur mit einer Wagschale gehängt wird. Die Rolle wird so gestellt, daß die Schnur horizontal steht.

Man kann nun aus der Entfernung der Direktionslinie der Schwere von jener Kante, über welche das Prisma geworfen werden soll, aus der Entfernung des Angriffspunktes von derselben Kante und aus dem ganzen Gewichte des Körpers das Gewicht berechnen, welches nach dem Gesetze über die Standfestigkeit an der Schnur angebracht werden muß, um in jeder der vier Stellungen, die der Körper haben kann, seine Standfestigkeit zu überwinden, wenn der Haken der Schnur an irgend einem der sechs Häkchen befestigt wird, wobei man die Wagschale natürlich mit einrechnet. Man schreibt das Gewicht des Körpers auf denselben, mißt die Entfernungen *rs*, *st*, indem man die Entfernung der Häkchen als 1 annimmt, und schreibt sie nebst dem für jedes Häkchen berechneten Gewichte zu diesem (W, 27).

Kajetan (1877) macht den Bleikörper in vertikaler Richtung verstellbar, um den paradox klingenden Satz nachzuweisen, daß die Kraft, welche zum Umstürzen des Körpers nötig ist, unabhängig ist von der Erhebung des Schwerpunktes über die Basis. (E, 40.)

Leminger konstruierte einen Apparat, bestehend aus einem schweren Bleiwürfel, welcher an einem Stativ in beliebiger Höhe festgestellt werden kann. Den Fuß dieses Stativs bilden zwei gegeneinander verstellbare Platten, von denen die untere gegen eine ganz schwache Leiste, die Kante, um welche das Ganze gekippt werden soll, anstößt. Diese Leiste befindet sich auf dem Grundbrett des ganzen Apparates, welches mit drei Stellschrauben zum Horizontalstellen versehen ist und außerdem noch eine vertikale Säule mit der Rolle zum Überleiten der Schnur trägt (Dr. Houdek u. Hervert in Prag liefern den Apparat zu 20 fl.).

Strack (1886) bildet den Körper aus einem quaderförmigen, durch Zwischenwände in acht würfelförmige Fächer eingeteilten Holzrahmen von 10 cm Breite, 20 cm Höhe und 100 g Gewicht. In die Fächer werden entsprechende würfelförmige Gewichte von je 100 g eingeschoben. Dadurch, daß die einzelnen Fächer ausgefüllt oder leer gelassen werden, lassen sich 256 verschiedene Körperformen herstellen. Die Schwerpunkte derselben sind auf zwei an der Vorder- und Rückseite des Gestells befestigten Holzplättchen markiert [1]).

38. Auflagedrucke einer unterstützten Scheibe. Zur Demonstration der Druckverteilung in den drei Unterstützungspunkten einer Ebene kann man eine schwere Platte auf drei Spitzen aufsetzen, von welchen zwei fest sind und die dritte auf eine Federwage aufgesetzt ist.

Pietzker (1885) benutzt den Apparat, Fig. 2120, dessen Einrichtung aus der Figur wohl ohne weiteres ersichtlich ist. (E, 45.)

Als drückender Körper dient dabei eine kreisrunde Glasscheibe von 300 g Gewicht, 21 cm Durchmesser und 1 mm Dicke. Die Unterstützungspunkte bilden ein rechtwinkliges Dreieck mit dem Seitenverhältnis 5 : 4 : 3. Der Schwerpunkt der Platte wird der Reihe nach gelegt: 1. auf den Halbierungspunkt der Hypotenusenhöhe, 2. auf deren Fußpunkt, 3. auf den Mittelpunkt des dem Dreieck *ABC* einbeschriebenen Kreises, 4. auf den Mittelpunkt des der Seite *AB* anliegenden äußeren Berührungskreises. Für diese vier Fälle ergaben sich folgende Druckverhält-

[1]) Über Nebenapparate zum Standfestigkeitsapparate siehe Z. 9, 31, 1896.

nisse: 1. 150, 96, 54 g, 2. 0, 192, 108 g, 3. 125, 100, 75 g, 4. 250, 200, — 150 g.

Zur Demonstration des Gleichgewichts einer um einen Punkt drehbaren Scheibe dient das Hebelbrett von Melde[1]) (Fig. 2121 E, 22,50).

39. Die Zeigerwage. Ich benutze eine selbsthergestellte Wage von großen Dimensionen, bei welcher durch Anschrauben von Gewichten die Empfindlichkeit in bestimmtem Verhältnis geändert werden kann, so daß die Teilstriche z. B. statt Grammen, Dekagramme bedeuten. Kleine Zeigerwagen sind als Briefwagen überall käuflich zu haben[2]) (Fig. 2122 Lb, 14 und 2123 Lb, 27.)

Fig. 2120.

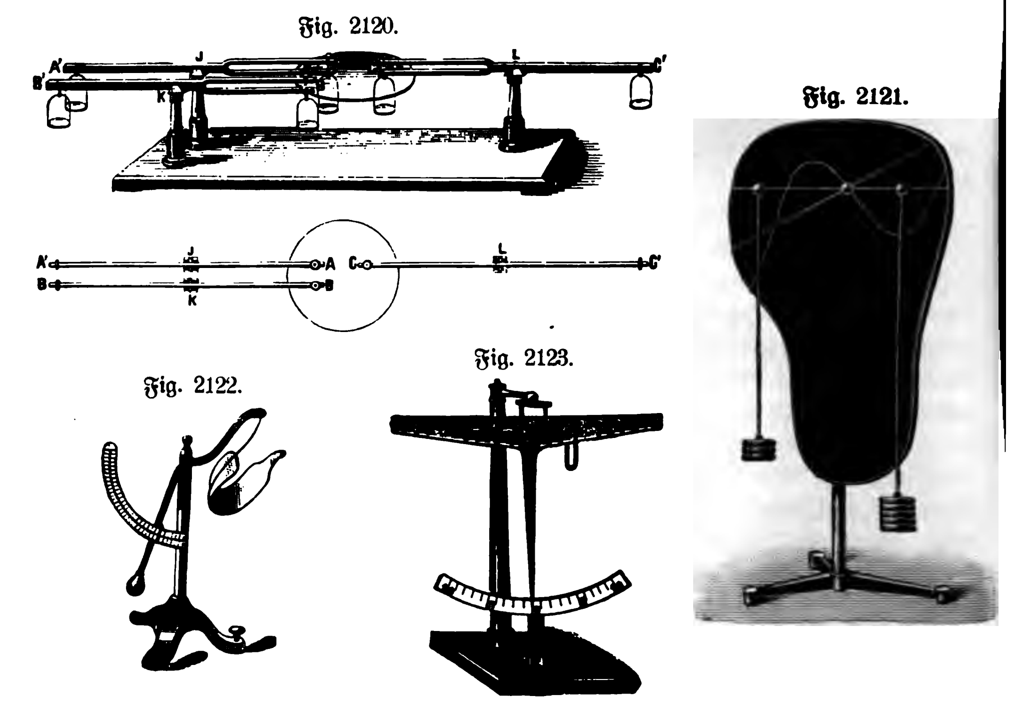


Fig. 2121.

Fig. 2122.

Fig. 2123.

40. Die Wage. Man muß sich mindestens zwei, besser drei Wagen beschaffen; eine solche für gewöhnliche Zwecke (Fig. 2124 Lb, 27), eine für feine Wägungen (Fig. 2125 Lb, 440 bis 700) und, wenn möglich, eine speziell für Demonstrationen geeignete (Fig. 2126 Lb, 450). Zu letzterem Zwecke benutze ich eine Wage von 5 kg Tragkraft auf einem 2 m hohen kräftigen eisernen Stativ, welches eventuell auf Rollen fortgeschoben werden kann. Dasselbe ist mit Stellschrauben versehen, welche ebenso wie die in Fig. 2126 sichtbaren Stellschrauben zur Einstellung des Zeigers auf den Nullpunkt dienen.

[1]) Siehe auch Grimsehl, Z. 16, 261, 1903. — [2]) Gewöhnliche Zeigerwagen liefert Louis Schopper, Leipzig, Arndtstraße 27. Über eine Demonstrations-Zeigerwage für verschiedene Versuche s. Z. 10, 127, 1897. Durch eine graphische Darstellung kann man zeigen, daß die Beziehung zwischen Belastung und Ausschlag dem Tangentengesetz entspricht. Sind nämlich a und b die Entfernungen der Angriffspunkte der Kräfte P und Q vom Drehpunkt, so ist $P = Q \cdot \frac{b}{a} \cdot tg\,\beta$, wenn β den Ablenkungswinkel bezeichnet.

Die Art, wie die Empfindlichkeit einer Wage von der Lage ihres Schwerpunktes abhängt, kann man an irgend einer großen Wage mit (langem) Zeiger und Skala erläutern, indem man an dem Zeiger ein verschiebbares Gewicht anklemmt. Hierbei kann man zugleich die Skala wie bei der Zeigerwage eichen, was am einfachsten durch Aufsetzen eines dem größten Ausschlag entsprechenden Reitergewichts geschieht, falls der Wagebalken mit den nötigen Teilstrichen versehen ist.

In einfachster Weise kann die Änderung der Empfindlichkeit nach Greiß durch die in Fig. 2127 abgebildete Vorrichtung gezeigt werden. Durch einen Kork werden eine ganze und zwei halbe Stricknadeln rechtwinklig zueinander durchgesteckt und dann wird der Apparat auf zwei Trinkgläser gelegt, so daß die ganze Nadel den Wagebalken und die vertikale halbe die Zunge vorstellt. Durch Verschiebung der letzteren kann man die Lage des Schwerpunktes der Höhe nach beliebig ändern und dadurch den Erfolg zeigen, je nachdem der Schwerpunkt mehr oder weniger weit unter oder gar über der Achse liegt.

Fig. 2124.



Fig. 2125.



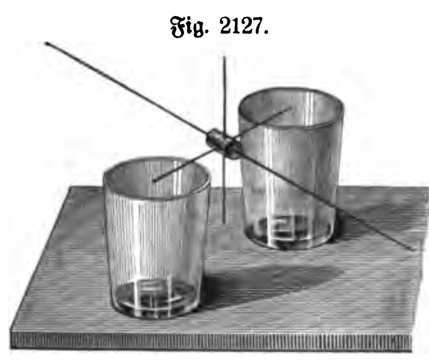
Um die Ausschläge der Wage für einen größeren Zuhörerkreis sichtbar zu machen, setzt Schwedoff (Z. 16, 323, 1903) den Wagebalken in Verbindung mit einer über eine kleine Rolle geführten, in Spiralfedern auslaufenden Schnur (Band), so daß ein langer, mit dieser Rolle verbundener Zeiger auch bei sehr geringer Drehung des Wagebalkens weit ausschlägt. (Fig. 2128.)

Einen zur Erläuterung der verschiedenen Verhältnisse, welche auf die Empfindlichkeit der Wage Einfluß haben, sehr geeigneten Apparat von Buff zeigt Fig. 2129. Der Wagebalken *aa* besteht aus Holz, ist hohl

Fig. 2126.



Fig. 2127.



und an den Enden mit messingenen Zwingen versehen; aus ihm lassen sich die mit einer Einteilung versehenen Stäbe *bb* beliebig herausziehen und durch die Schrauben *cc* feststellen. Diese Stäbe tragen kleine, mit Einteilung versehene hölzerne Rahmen *dd*, in welchen sich die Schneiden der Wagschalen, die von den Messingstücken *ee* getragen werden, verschieben und durch die Schrauben *ff* feststellen lassen. Die Lage des Schwerpunktes läßt sich durch die auf der Zunge verschiebbaren Gewichte *g*, *h* ändern. Die Wagschalen hängen an den langen Bügeln *ii*. Man kann also die Länge der Wagebalken, die Aufhängepunkte der Schalen und den Schwerpunkt verändern.

Zur Demonstration der Verwendung der Reitergewichte benutze ich einen eingeteilten Wagebalken einer absichtlich wenig empfindlich gemachten Wage und einen schweren großen Reiter.

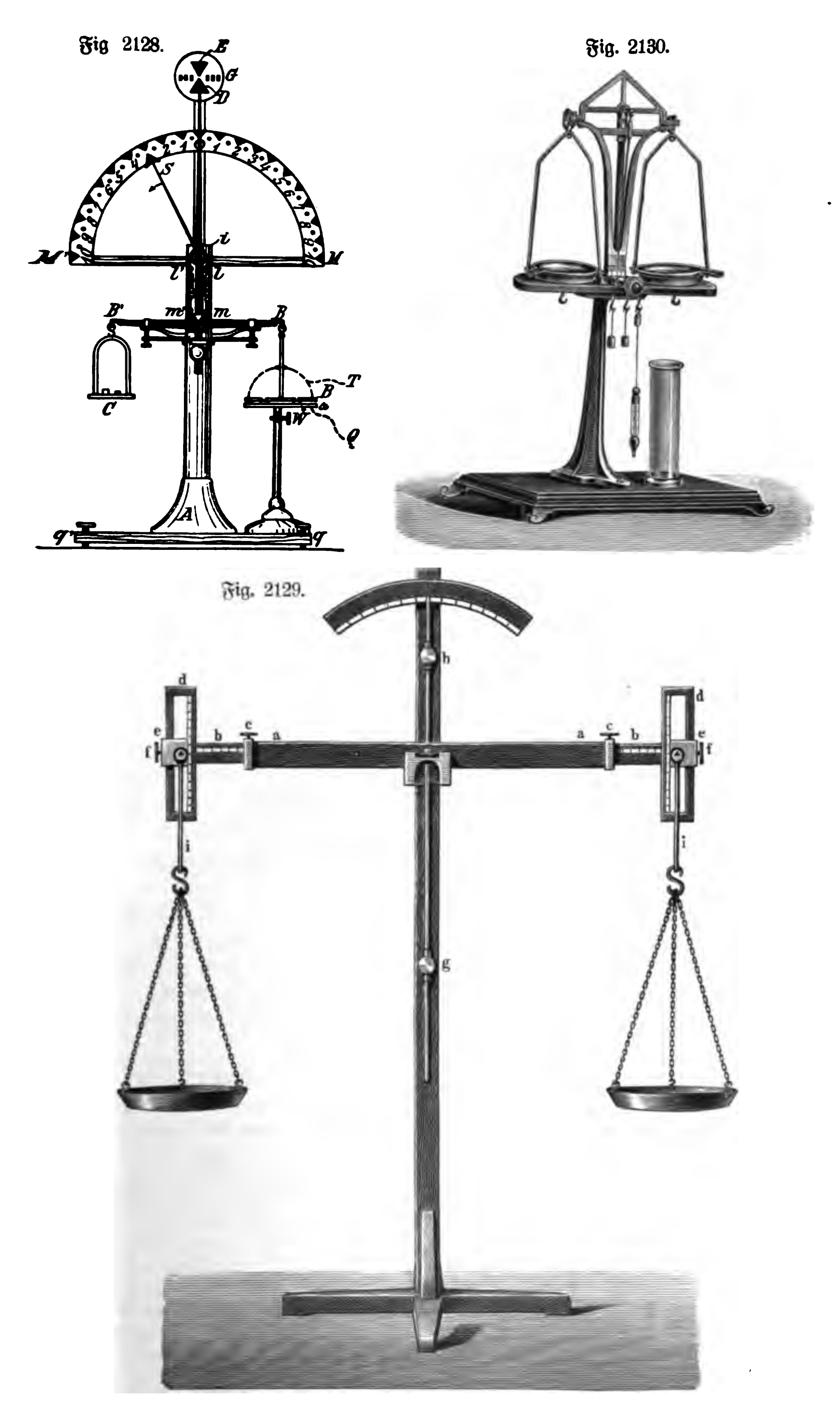


Fig 2128.

Fig. 2130.

Fig. 2129.

Eine komplizierte, genaue Demonstrationswage wurde von dem Präzisionsmechaniker Rueprecht in Wien IV, Favoritenstraße 25, 1882 beschrieben. An derselben sollen alle Gesetze, auf denen die Theorie und Wirkungsweise der Wage beruht, nachgewiesen und gleichzeitig alle mit einer Wage ausführbaren Arbeiten in Form von Vorlesungsversuchen selbst den größten Auditorien ersichtlich gemacht werden können.

Von den Versuchen sind besonders hervorzuheben: Teilbarkeit des Hebels, Wirkung der Verlegung des Schwerpunktes im vertikalen Sinne, indifferentes Gleichgewicht der Wage, Zu- und Abnahme der Empfindlichkeit der Wage durch Verlängerung oder Verkürzung des Hebels, Vor- und Nachteile der kurzarmigen Wage, Wägen mit ungleicharmiger Wage, Bestimmung des Hebelfehlers, Folgen des Hebens und Senkens der seitlichen Aufhängepunkte, Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester und flüssiger Körper u. s. w.[1]). Der Preis der in Fig. 2126 dargestellten Demonstrationswage beträgt 450 Kronen (= 370 Mk.). Bei 2 kg Belastung ist die Empfindlichkeit noch 10 mg.

Leppin u. Masche, Berlin, liefern die in Fig. 2130 dargestellte Wage zu 50 Mk.

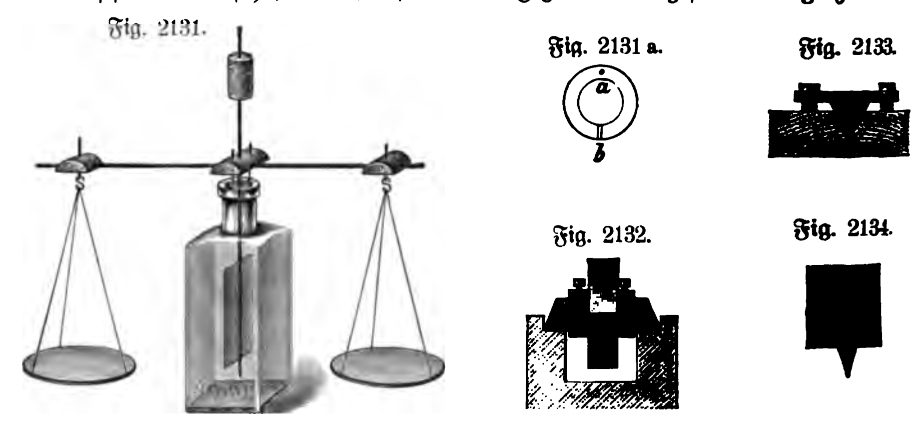


Fig. 2131. Fig. 2131 a. Fig. 2133. Fig. 2132. Fig. 2134.

Eine einfache, aus Strick- und Nähnadeln, Papier und Kork und einer Flasche zusammengesetzte feine Wage beschreibt Tabonnet (Z. 9, 142, 1896). 50 g lassen sich damit auf 1 mg genau wägen. Die Konstruktion ist aus Fig. 2131 wohl ohne weiteres klar. Die Fig. 2131 a zeigt den oberen Rand der Flasche, in welchen mit einer Dreikantfeile eine kleine Höhlung *a* und eine Rille *b* eingearbeitet sind, um den Spitzen Halt zu geben.

Kleine Gewichte zu dieser Wage kann man sich ohne weiteres selbst herstellen, indem man von dünnem Messingdraht, von welchem etwa 3 m 1 g wiegen, soviel abschneidet, daß einem Zwanzigmarkstück (= 7,965 g) das Gleichgewicht gehalten wird, und nun mittels des Maßstabes Längen herstellt, welche 1 dg, 1 cg und 1 mg entsprechen. Die größeren werden zusammengerollt, so daß ein Ende als Griff vorsteht. Verschiedene einfache Befestigungsarten von Schneiden zeigen die Fig. 2132, 2133 und 2134[2]).

[1]) Zu erklären wäre auch die Arretierung zum Schutze der Schneiden, der Glaskasten zur Abhaltung von Staub und Luftströmungen, die Methode der Ablesung bei schwingenden Wagebalken und deren Vorteile, die Bestimmung der Empfindlichkeit und die Tariermethode. — [2]) Einige Bezugsquellen von Wagen sind: Paul Bunge, Hamburg-Eilbeck, Ottostraße 13; Sartorius, Göttingen; Sauter, Ebingen (Württemberg); G. Hartner,

41. Gewichte. Die Form der Gewichte ist am besten schwach konisch mit einem kleinen Kopfe zum Anfassen. Als Material ist Messing zu empfehlen, welches bei ganz genauen Gewichten vernickelt oder vergoldet wird. Die Gewichte unter 1 g werden aus Platin gemacht. (Fig. 2135 Lb, 8.) Selbst bei gehöriger Vorsicht, wozu namentlich das nicht zu umgehende jedesmalige Einlegen der Gewichtsteile, welche nicht gerade auf der Wage liegen, an die gehörige Stelle des Futterals gehört, wird es doch wohl auch begegnen, daß eines der kleineren Gewichte durch unrichtiges Anfassen mit dem Zängchen ausspringt und nicht wieder gefunden wird. Darum wird es gut sein, sich bei Zeiten die kleinen Gewichte aus recht dünnem Feinsilber- oder Aluminiumblech mehrfach anzufertigen. Bis auf Zentigramme reicht zum Justieren auch die oben erwähnte feine Wage aus. Allein für die Milligramme wird man sich nur so helfen können, daß man aus einer allenthalben gleich dicken Stelle des Bleches ein viereckiges Stück von 1 dg abwiegt, es mit dem Zirkel am Rande sorgfältig teilt und dann mit einem scharfen Messer längs einem metallenen Lineale in Stücke von 5, 4, 3, 2, 1 mg zerschneidet. Die einzelnen Stücke werden dann auf der Wage noch nachgewogen, um etwaige gröbere Unrichtigkeiten zu entdecken. Für die kleinen Stücke ist Aluminium zu empfehlen, da sie bei diesem Materiale größer ausfallen.

Fig. 2135.

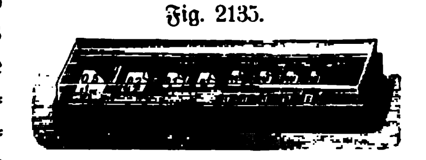


Fig. 2136.



Beim Gebrauche faßt man die Gewichte nicht mit den Fingern, sondern mit der dem Gewichtsatze beigegebenen Kornzange (Pinzette). Besondere Vorsicht ist nötig beim Arbeiten mit Quecksilber, da durch kleine, an den Händen oder auf dem

---

Ebingen; Oscar A. Richter, Dresden, Güterbahnhofstraße 8; J. A. Bosch, Straßburg i. E.; R. Brunnée (Voigt u. Hochgesang) Göttingen, Untere Maschstraße 26; Gottl. Kern u. Sohn, Ebingen; Max Beckel in Hamburg, Roßberg 3; Spoerhase (vorm. Staudinger), Gießen (Hessen); Verbeck u. Pechholdt, Dresden-Altstadt, Gärtnergasse 4; Aug. Oertling, Berlin N, Oranienstraße 57; W. H. F. Kuhlmann, Hamburg-Hohenfelde, Steilshoperstraße 103; Georg Westphal, Mech. Institut, Celle (Prov. Hannover). Sehr feine Wagen für wissenschaftliche Untersuchungen konstruieren namentlich Stückrath in Berlin, Jos. Nemetz in Wien V, Sonnenhofgasse 4 und mehrere der schon Genannten. Sartorius in Göttingen liefert beispielsweise Wagen von 0,5 mg Empfindlichkeit bei 2000 g Belastung zu 750 Mk., solche von 0,05 mg Empfindlichkeit bei 50 g Belastung zu 400 Mk., ferner von 1 mg Empfindlichkeit bei 2000 mg Belastung zu 450 Mk. und 0,1 mg Empfindlichkeit bei 100 g Belastung zu 220 Mk. Alb. Rueprecht, Wien IV, Favoritengasse 25, liefert eine besonders bequeme feine Wage für Tragkräfte von 200 g bis 2 kg zu 700 bis 1660 Kronen. Die Wage bietet den großen Vorteil, daß durch Drehung eines Schlüssels während der Wägung durch Verlegung des Schwerpunktes die Empfindlichkeit auf $^1/_{10}$ sowie $^1/_{100}$ reduziert werden kann, was außerordentlich rasche Wägung ermöglicht, insbesondere unter Benutzung von Reiter und Skala, ferner den weiteren Vorteil, daß die Bruchgrammgewichte vermittelst einer Tastatur bei geschlossenem Wagekasten aufgelegt werden können. Ähnliche Wagen liefert auch Sartorius, Göttingen.

Tische haftende Quecksilbertröpfchen die Gewichtstücke leicht verunreinigt und unbrauchbar gemacht werden.

Käufliche Gewichtsätze zeigen die Fig. 2135 Lb, 8 und 2136 Lb, 16 bis 60.

42. **Fehler der Wage.** Um nicht zu viel Zeit durch Probieren zu verlieren, habe ich einfache mit Fehlern behaftete Modelle der Wage herstellen lassen, für welche das erforderliche Zusatzgewicht, um die Wage bei beiderseits gleicher Belastung, z. B. mit je 1 kg, ins Gleichgewicht zu bringen, vorher ausprobiert ist und deshalb ohne Zeitverlust demonstriert werden kann. Die Verhältnisse sind dabei so gewählt, daß die Zusatzgewichte möglichst hoch ausfallen, ohne daß die fehlerhafte Konstruktion der Wage auffällig hervortritt. Diese Modelle stellen folgende Fälle dar:

1. Ungleiche Arme. Werden beiderseits 20 g aufgelegt, so stellt sich der Zeiger anscheinend auf den Nullpunkt. Wird aber jede Wagschale mit 1 kg belastet, so neigt sich der Wagebalken stark nach einer Seite und es muß ein Zusatzgewicht von 70 g auf der anderen Seite zugelegt werden um das Gleichgewicht wiederherzustellen.

2. Zu tiefe Endschneiden. Beiderseits werden 20 g aufgelegt. Ein Zusatzgewicht von 10 g auf einer Seite bewirkt eine tiefe Senkung nach dieser Seite. Wird nun beiderseits 1 kg aufgesetzt, so stört ein Zusatzgewicht von 10 g auf einer Seite das Gleichgewicht nicht in merklicher Weise, selbst nicht ein wesentlich größeres.

3. Biegsamer Wagebalken, gebildet aus einer dünnen flachen Stahllamelle. Man kann sich leicht überzeugen, daß die drei Schneiden in einer Ebene liegen, nichtsdestoweniger hat die Wage denselben Fehler wie die vorige.

4. Endschneiden zu hoch. Werden beiderseits 20 g aufgelegt, so stellt sich der Zeiger auf den Nullpunkt. Ein Übergewicht von 1 g auf der einen oder anderen Seite bedingt einen deutlichen Ausschlag. Wird die Wage beiderseits mit 1 kg belastet, so kippt sie nach der einen oder anderen Seite um, es ist nicht mehr möglich zu wägen, das Gleichgewicht ist labil.

5. Endschneiden schief. Werden beide Wagschalen in der Mitte mit je 1 kg belastet, so stellt sich der Zeiger auf Null. Wird aber eines der Gewichte verschoben in der Richtung nach dem einen Ende der betreffenden Schneide, so ist das Gleichgewicht gestört, und wird auch das andere in gleichem Sinne verschoben, so kann die Störung so groß werden, daß ein Zusatzgewicht von 100 g auf einer Seite erforderlich ist, um das Gleichgewicht wieder herzustellen.

6. Zu große Reibung. Kein bestimmter Nullpunkt. Nur durch das Schwingungsverfahren ist es möglich, die Lage desselben zu ermitteln.

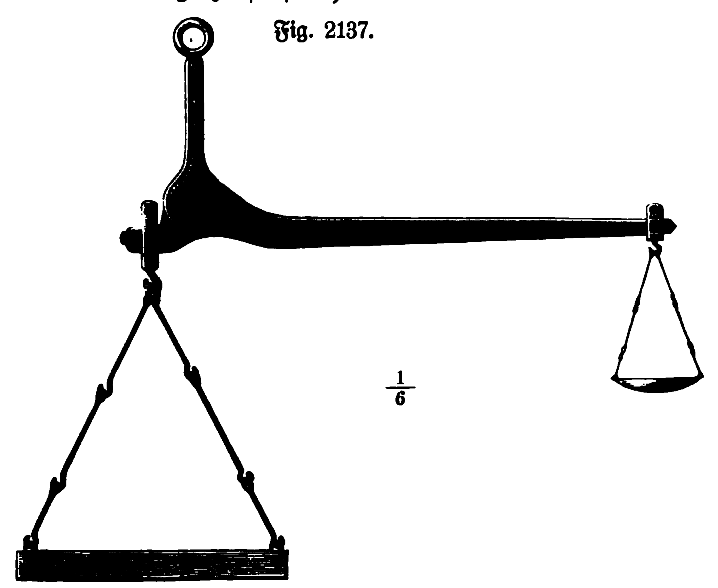
Emsmann (1885) empfiehlt eine gewöhnliche schlechte Krämerwage als sehr geeignetes Demonstrationsobjekt. Über ein von ihm gebrauchtes Exemplar äußert er sich wie folgt: „Nach Abnahme der Schalen neigte sich der Wagebalken etwas nach der einen Seite, so daß die Zunge nicht in der Schere stand. Wurden die Schalen eingehängt, so war die Stellung der Zunge anders als vorher. Vertauschte man die Schalen, so stand die Zunge wieder verschieden. Die Schalen waren also dem Gewichte nach nicht gleich. Dieser Fehler ließ sich leicht verbessern. Statt der einen Schale wurde von einer anderen Wage eine leichtere Schale eingehängt und diese mit Schrotkörnern gefüllt, bis die Zunge einstand. Hierauf wurde die zweite Schale an Stelle der ersteren gebracht und stand die Zunge auch jetzt ein, so hatten beide Schalen gleiches Gewicht; war dies aber nicht der Fall, sondern neigte sich

die Zunge nach der mit Schrotkörnern belasteten, so war die zweite Schale die leichtere und es konnte nun auf diese ein Stück Bindfaden aufgelegt werden, welches durch allmähliches Verkürzen endlich die Zunge zum Einstehen brachte und hierauf an den Aufhängeschnüren befestigt wurde. Jetzt zeigte sich bei Vertauschung der Schalen derselbe Stand der Zunge, aber sie stand nicht in der Schere. Woran lag nun der Fehler? — Die Aufhängepunkte der Schalen waren nicht in gleichem Abstande von der Wellenschneide. Ein Fehler, welcher sich an der in Rede stehenden Wage nicht abändern ließ. Der Wagebalken war also falsch, wofür schon sprach, daß der ledige Wagebalken mit der Zunge nicht einstand.

War die Wage deshalb unbrauchbar? Sie gab bei dem Versuche mit den Schrotkörnern beim Zulegen eines kleinen Schrotkornes immer einen noch merklichen Ausschlag, besaß also eine genügende Empfindlichkeit, und bei der Methode der doppelten Abwägung (Brodaſches Verfahren) leistete dieselbe noch vollkommen Befriedigendes. Man legt den zu wiegenden Körper in die eine Wagschale und in die andere Schrotkörner oder kleine Steine (Kiesel), zuletzt wohl gar noch Papierschnitzel, bis die Zunge einsteht, nimmt dann den Körper von der Schale und ersetzt ihn durch Gewichtstücke, bis die Zunge wieder einsteht. Dann giebt die Summe der Gewichtstücke genau das Gewicht des Körpers.

Auf diesem Wege erhalten die Schüler am leichtesten und sichersten Kenntnis davon, wie man eine Wage zu prüfen hat."

Fig. 2137.



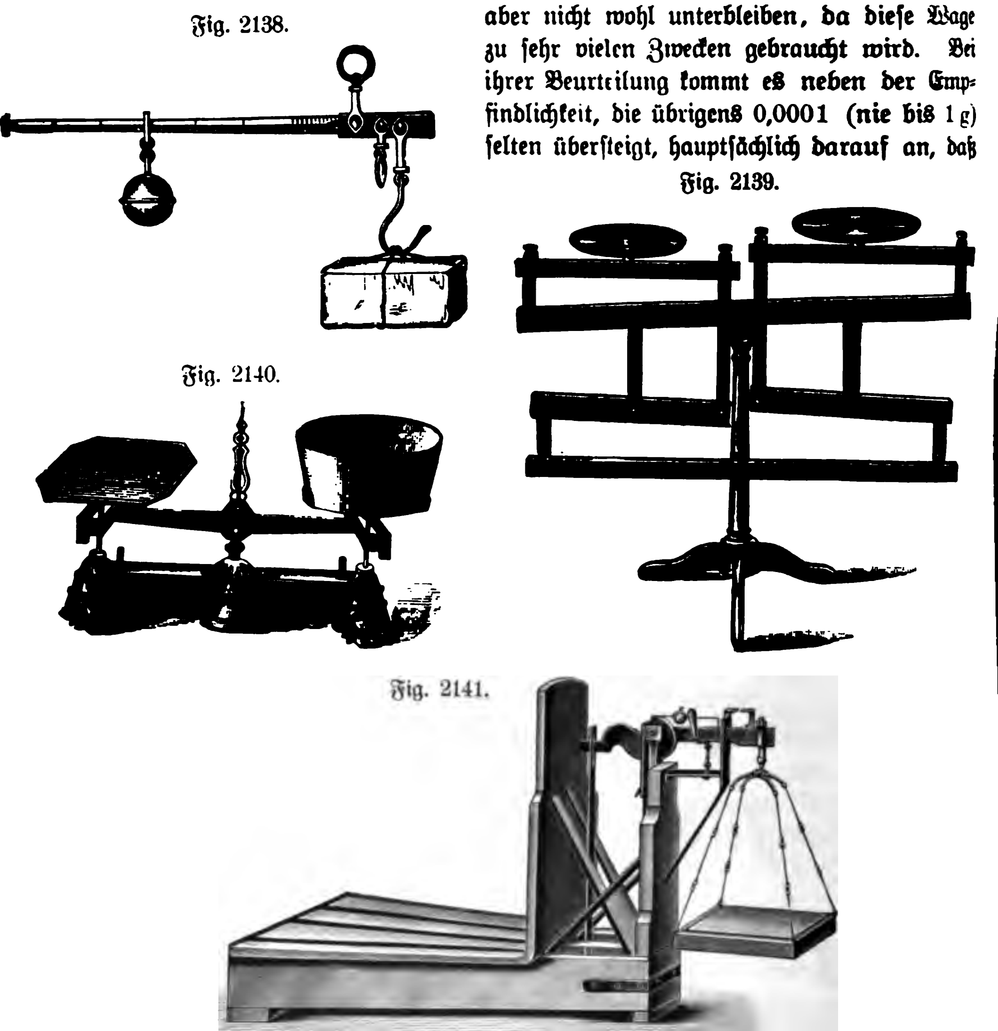
43. Die ungleicharmige Wage. Zu rohen Wägungen schwerer Körper dient die in Fig. 2137 dargestellte Wage mit ungleich langen Armen. Die Schalen sind so gearbeitet, daß die leere Wage im Gleichgewichte ist. Bei den in Fig. 2137 in $^1/_6$ natürlicher Größe angegebenen Dimensionen kann eine solche Wage leicht 25 kg Tragkraft erreichen. (E, 8 bis 18 Mk.)

44. Schnellwage. Eine gewöhnliche (römische) Schnellwage mit Läufer zeigt Fig. 2138 Lb, 7,50; man kontrolliert dieselbe vor dem Ankaufe durch angehängte Gewichte.

45. Tafelwage nach Béranger. Die Einrichtung erläutert man zweckmäßig an einem aus Holzstäben zusammengesetzten Modell (Fig. 2139 Lb, 45).

Eine Robervalsche Wage von üblicher Form zeigt Fig. 2140 Lb, 11,20.

46. Brückenwage. Die Einrichtung der gewöhnlichen Quintenzschen Brückenwage (Fig. 2141 Lb, 13 bis 32) kann an jedem Exemplare erläutert werden, darf aber nicht wohl unterbleiben, da diese Wage zu sehr vielen Zwecken gebraucht wird. Bei ihrer Beurteilung kommt es neben der Empfindlichkeit, die übrigens 0,0001 (nie bis 1 g) selten übersteigt, hauptsächlich darauf an, daß sie ihr Dezimalverhältnis bei verschiedenen Gewichten bewährt, wenn auch die Gewichte auf eine beliebige Stelle der Brücke gebracht werden. Sehr geeignet zur Demonstration ist ein Modell, wie es die Fig. 2142 und 2143 (E, 50) zeigen.


Fig. 2138. Fig. 2139. Fig. 2140. Fig. 2141.

47. Hebel mit schief angreifenden Kräften. Wie man ein gewöhnliches Hebelmodell zur Demonstration der Wirkung schief angreifender Kräfte benutzen kann, ist bereits in Fig. 2087 angedeutet. Spezielle Apparate zu diesem Nachweise sind in den Fig. 2144 (E, 27,5) und 2145 (E, 55) dargestellt.

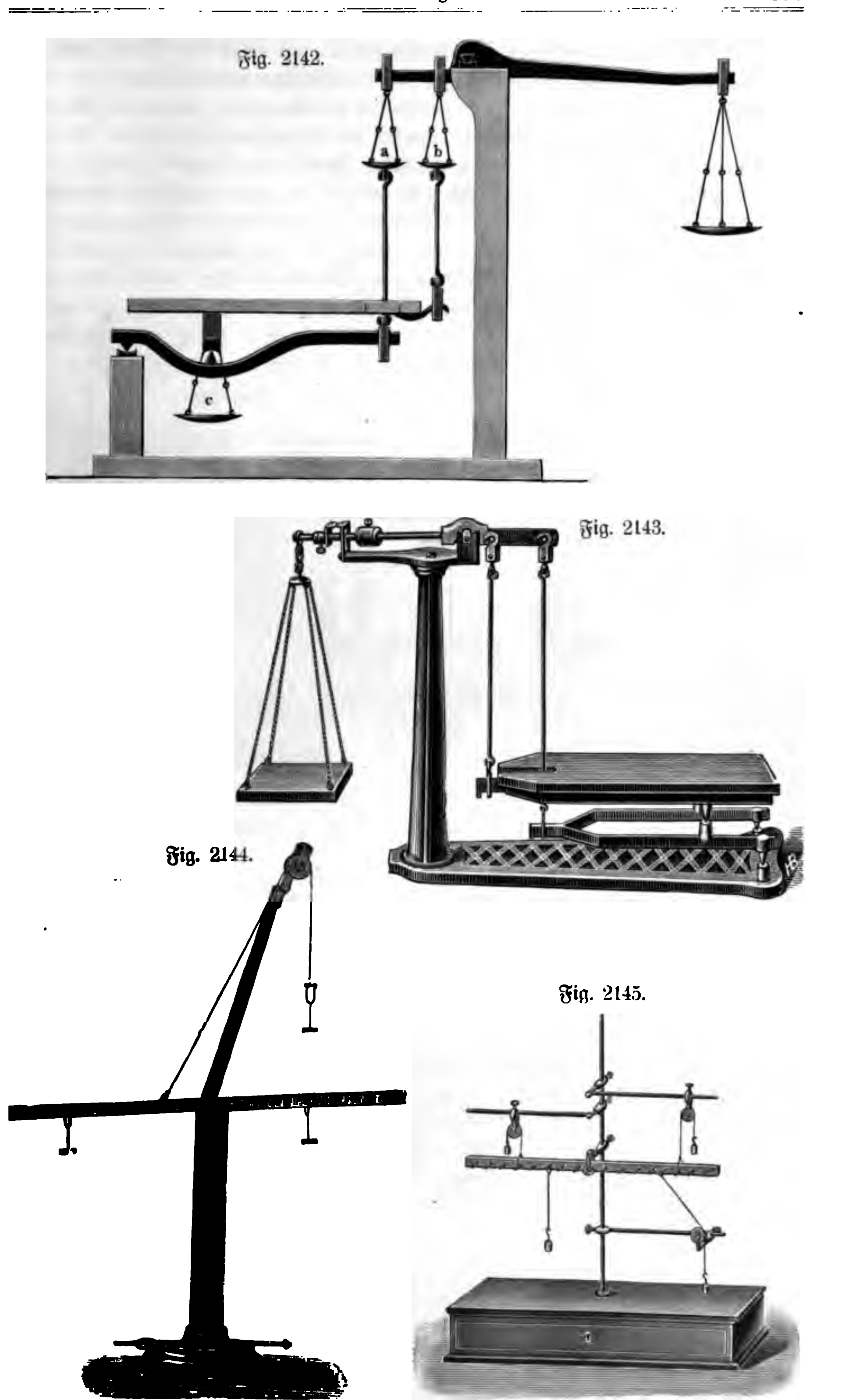


Fig. 2142.

Fig. 2143.

Fig. 2144.

Fig. 2145.

Die Wirkung der schiefen Kräfte wurde auf S. 680 nach dem Momentensatz bestimmt, d. h. man dachte sich die Kräfte auf ein Wellrad wirkend. Eine andere Art der Ableitung ist die, daß man, wie es bei der Ableitung der Formel für das Wellrad geschah, eine kleine virtuelle Verschiebung vor sich gehen läßt und die dabei verlorenen und gewonnenen Arbeiten gleich setzt. Soll diese Methode zu der gleichen Formel führen, so ist notwendig, daß man als Arbeit einer schief wirkenden Kraft, d. h. einer Arbeit, bei welcher sich der Angriffspunkt nicht in der Richtung der Kraft bewegt, nicht einfach das Produkt von Kraft und Weg betrachtet, sondern dieses Produkt multipliziert mit dem Kosinus des Winkels zwischen beiden Richtungen. Man kann also sagen, die Arbeit einer schiefwirkenden Kraft ist das Produkt der Kraft mit der Verschiebung des Angriffspunktes in ihrer Richtung, oder das Produkt der Projektion der Kraft auf die Richtung der Verschiebung × dem Wege, oder wie früher (S. 668) erklärt, Kraft × Verkürzung ihrer Achse.

Fig. 2146.

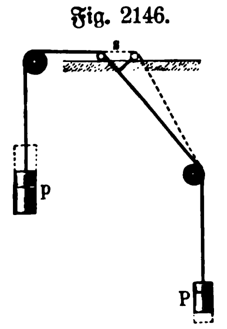
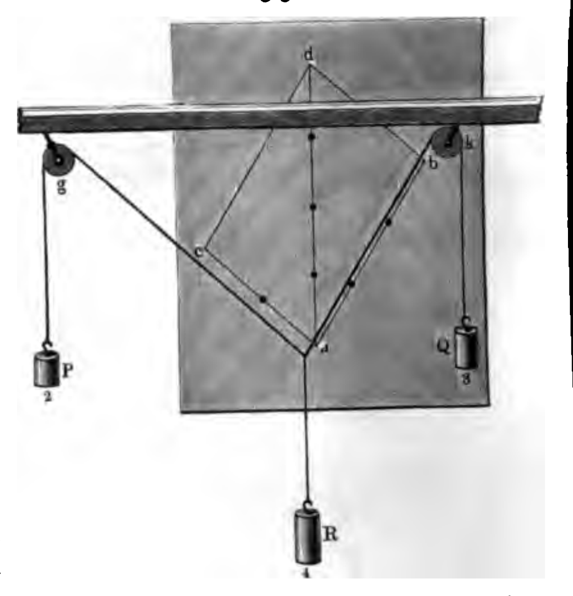


Fig. 2147.



48. Gezwungene Bewegung. Zur Demonstration der Gesetze der gezwungenen Bewegung (Fig. 2146) benutze ich einen aus großen eisernen Stativen und Latten zusammengebauten Apparat.

Der Körper, welcher durch die belasteten Schnüre auf horizontaler Bahn im Gleichgewicht gehalten wird, ist ein kleiner Wagen, die Bahn selbst ein Geleise aus T-Eisenschienen [1]).

49. Das Parallelogramm der Kräfte [2]). Man kann etwa an der Zimmerdecke oder an einem Tische zwei Rollen, *g*, *k*, wie in Fig. 2147, und beliebige Gewichte *P*, *Q*, *R* an der dreischenkligen Schnur anbringen und durch Konstruktion den Winkel suchen, den die drei Kräfte nach dem Gesetze miteinander machen müssen;

[1]) Beispielsweise ist für den in Fig. 2146 dargestellten Fall, wenn $p = 6{,}5$ kg und $P = 10$ kg, Gleichgewicht vorhanden, wenn der Winkel zwischen den beiden Schnurrichtungen 50° beträgt. — [2]) Der Satz vom Parallelogramm der Kräfte wird gewöhnlich als Axiom eingeführt. Da bei dem hier befolgten Lehrgange das Prinzip von der Erhaltung der (potentiellen) Energie als Fundamentalsatz eingeführt wurde, muß nun umgekehrt daraus der Satz vom Kräfteparallelogramm abgeleitet werden. Es genügt eine einfache Betrachtung, welche zeigt, daß die Arbeit der Resultierenden gleich der der Komponenten ist, wenn der Punkt um eine sehr kleine Strecke verschoben wird.

hält man dann die etwas groß ausgeführte Konstruktionsfigur *abcd* hinter die Schnüre, so wird der Winkel immer dem gezeichneten entsprechen. Daß man bei solchen Versuchen der unvermeidlichen Reibung wegen kein ganz genaues Resultat erhält, ist natürlich; wenn man aber durch Ziehen an den Gewichten die Grenzen sucht, innerhalb welcher der Versuch schwankt, so werden diese immer gleich weit auf beiden Seiten abweichen, jedenfalls wird aber an der bestimmten Stelle Gleich-

Fig. 2148. Fig. 2150.

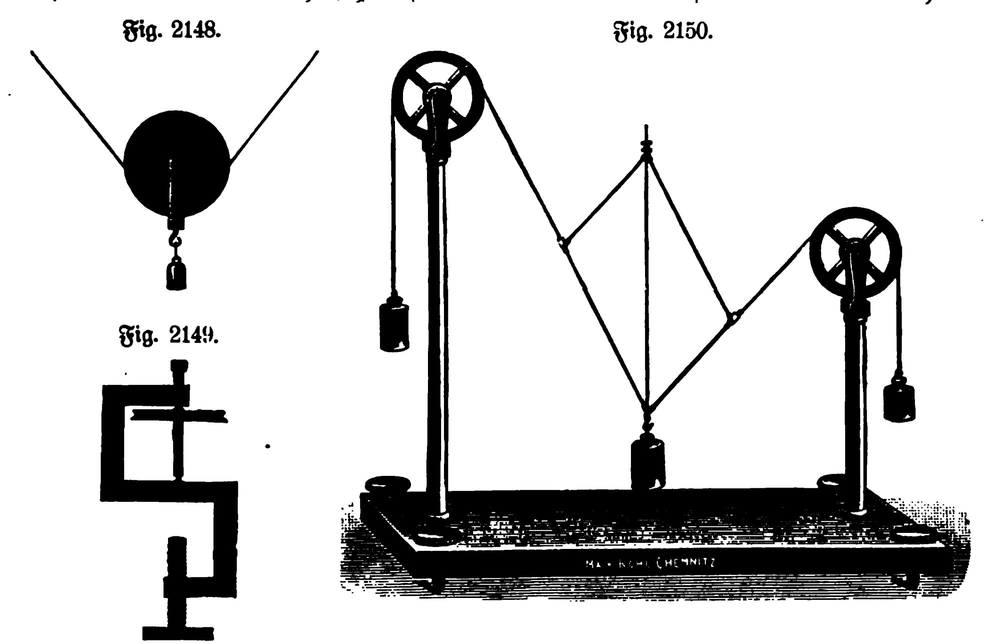


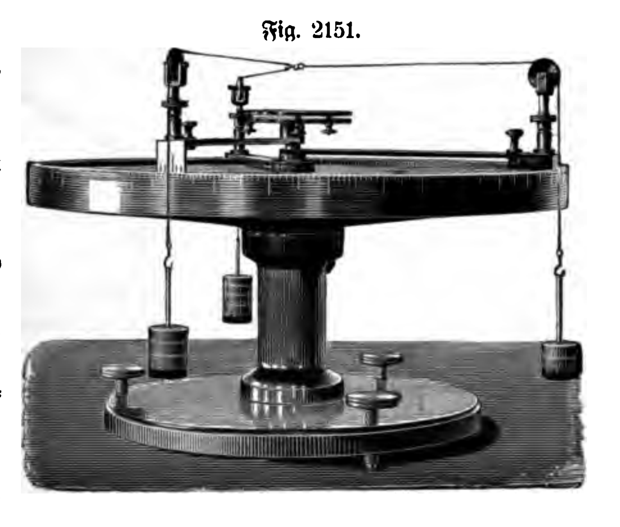
Fig. 2149.

gewicht stattfinden. Hängt man *R* an eine lose Rolle (Fig. 2148), so müssen natürlich die beiden Seitenkräfte gleich groß werden.

Bequeme Rollen zum Anschrauben zeigt Fig. 2149 (Lb, 17).

Die Fig. 2150 K, 85 und 2151 K, 220 zeigen besondere Apparate, welche zu gleichem Zwecke dienen.

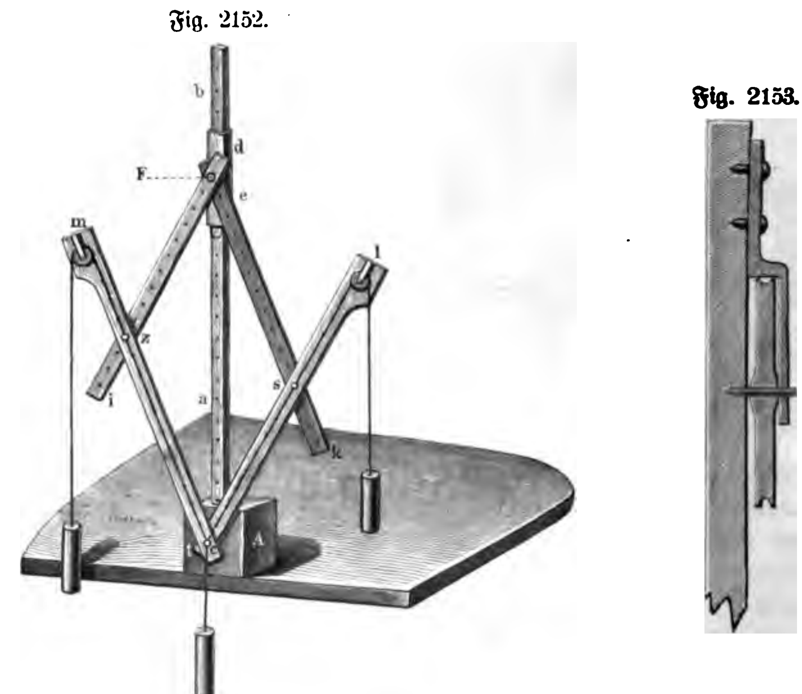
Fig. 2151.



Ein bequemer Demonstrationsapparat ist ferner in Fig. 2152 dargestellt. Auf dem vorderen Rande des Klotzes *A* ist ein vierkantiger Stab befestigt, der in gleichen Distanzen etwa zu 1 cm mit Löchern versehen ist, so aber, daß der Drehungspunkt *c* den Anfangspunkt derselben bildet; auf ihm schiebt sich die messingene Hülse *de*, deren Länge eine ganze Zahl der Teilung beträgt; sie wird durch einen eingeschobenen Nagel gehalten, und die Zahlen sind zu den Löchern so angeschrieben, daß die dem oberen Rande *d* der Hülse entsprechende Zahl die Entfernung *cF* angibt.

Die Hülse wird beim Drehpunkt so dick genommen, daß ihre vordere Fläche mit der vorderen Fläche des Klotzes *A* parallel wird und um die Dicke einer der Parallelogrammschienen weiter zurücksteht. Die dünnen Schienen *Fi*, *Fk*, *mc*, *lt* sind in gleichen Entfernungen wie der Stab mit Löchern versehen, die von ihren Drehungspunkten aus numeriert sind, und können bei *s*, *z* durch Nägel mit flachen Köpfen aufeinander gesteckt werden; daß diese Nägel rückwärts Schrauben haben ist nicht nötig, aber bequem. Außerdem tragen die Schienen *cm*, *lt* außerhalb sehr leicht bewegliche Rollen, deren Schnurläufe einerseits mit der Löcherreihe zusammenfallen. In diesen und ähnlichen Fällen gibt man den Rollen, die aus Buz sehr gut werden, gegen die Mitte eine kleine Verdickung (Fig. 2153 zeigt eine solche Rolle im Durchschnitte und in natürlicher Größe) und durchbohrt sie nun in der Stärke einer mittleren Stricknadel; aus einer solchen macht man auch die Achse, welche

Fig. 2152. Fig. 2153.



einerseits in das Holz eingeschlagen, anderseits durch einen Bügel aus Messingblech gehalten wird. Letzterer muß, ohne ihn zu streifen, so nahe an den Rand der Rolle reichen, daß die Schnur die Rolle nicht verlassen kann.

Beim Gebrauche knüpft man drei feine seidene Schnüre an einen sehr kleinen Messingring, wovon zwei über die Rollen gezogen werden, und bildet aus den fünf Stäben ein beliebiges Parallelogramm mit seiner Diagonale; hängt man sodann an die drei Schnurenden Gewichte, welche den Längen *cz*, *cs*, *cF* entsprechen, so wird Gleichgewicht stattfinden und der Knotenpunkt nach *c* kommen, und auch wieder dahin zurückkehren, wenn man ihn entfernt. Den Kloß *A* kann man auf einem entsprechenden Fuß befestigen oder auf den Rand eines Tisches stellen. In letzterem Falle muß er aber beschwert werden oder mit Blei ausgegossen sein.

Nimmt man als Mittelkraft ein anderes als ein der Diagonale entsprechendes Gewicht, so kommt der Knoten nicht nach *c*; man kann aber dann die Hülse so

weit verschieben, bis dieses eintritt, und die Länge der Diagonale wird nun wieder dem Gewichte entsprechen. (Lb, 32,60.)

Ein ähnlicher in vielen Kabinetten eingeführter Apparat ist der von Bertram (Fig. 2154).

Der Eckpunkt des Parallelogramms ist ein weißer Stift, über welchen ein Ring geschoben ist, an welchem die drei Fäden befestigt sind; die Richtungen der Kräfte werden gegeben durch die Richtungen der Schienen, von welchen die senkrechte fest nach oben gerichtet ist, während die zweite und dritte um den Stift am Stativ drehbar sind und letztere stets die Diagonale bildet. Die größte der Kräfte wird stets längs der senkrechten Schiene angenommen und = 100 festgesetzt, die der beiden anderen werden auf den graduierten

Fig. 2154.

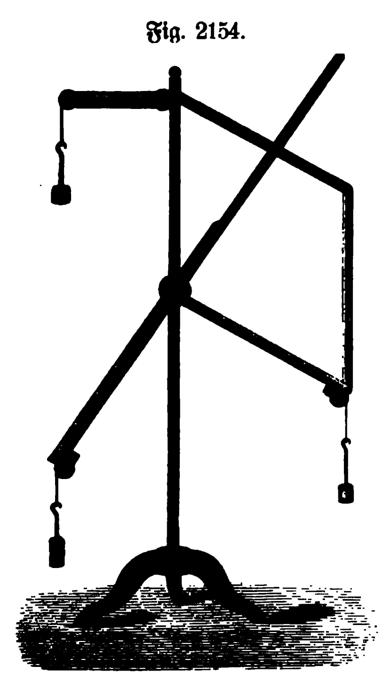
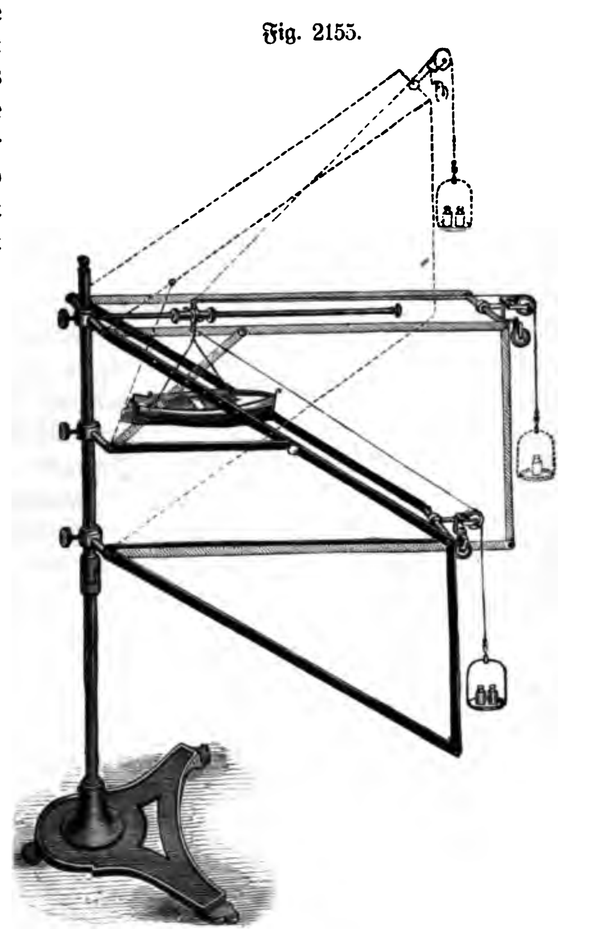


Fig. 2155.



Stäben abgelesen. Stellt man das Parallelogramm z. B. so, daß die geraden Strecken sich verhalten wie 100:70:80, so wird der Ring frei schweben, ohne den Stift zu berühren, wenn die Gewichte in den Schalen 100, 70, 80 betragen. (W, 20 bis 30, E, 24.)

Sprockhoff konstruierte einen Apparat, der zugleich dazu dienen kann, die Schiffssteuerung zu demonstrieren. Der Apparat nebst Beschreibung ist zu beziehen von Ernecke in Berlin. (Fig. 2155 E, 48.)

Krebs verwendet an der Stelle der Gewichte Federwagen und macht die Länge der (weißen) Schnüre ersichtlich durch daran angebrachte schwarze Teilpunkte (siehe Pogg. Ann. CXLII, 398).

Neu benutzt die bereits wiederholt erwähnten Meßdrähte [1]). Der Apparat ist in Fig. 2156 skizziert. Er besteht aus einem eisernen Dreifuß mit Stellschrauben und aus einer mit Schienen und Schiebern versehenen Säule von etwa 50 cm Höhe, an deren oberem Ende eine Zinkscheibe von 25 cm Durchmesser so befestigt ist, daß ihre Vorderfläche mit der Vorderfläche der Säule bezw. der Schiene in einer vertikalen Ebene liegt. Die Scheibe ist mit einer aus größerer Entfernung sichtbaren Kreisteilung von 5 zu 5° versehen, außerdem mit einer für die Ablesung aus der Nähe bestimmten Teilung in ganze Grade. Durch die Mitte der Scheibe geht ein horizontaler Zapfen (Schraubenbolzen), auf welchen zwei mit Schienen und Schiebern ausgerüstete Arme gesteckt sind. Diese Arme sind sonach in vertikaler Ebene um die Mitte der Scheibe drehbar und können in jeder Stellung durch Anziehen der auf der Rückseite befindlichen Schraubenmutter gegen die Vorderfläche der Zinkscheibe angepreßt und so festgeklemmt werden.

Fig. 2156.

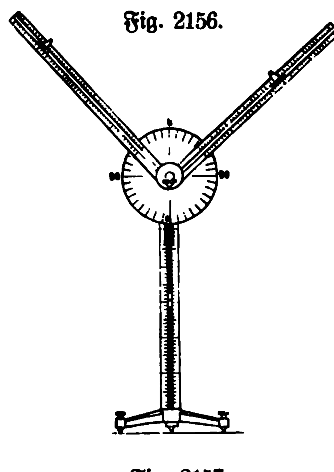
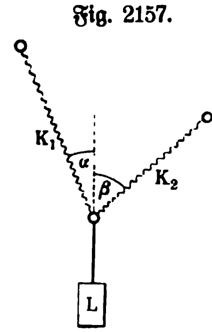


Fig. 2157.



Die Einrichtung der Arme ist eine zirkelartige, so daß sie bis zur vollständigen Berührung (ihrer ganzen Länge nach) einander genähert werden können; es laufen nämlich nicht die Mittellinien der Vorderflächen auf die Achse des Befestigungszapfens zu, sondern die bei völliger Annäherung der Arme sich berührenden Kanten. Nach diesen Kanten wird also auch jedesmal die Stellung der Arme zur Vertikalen an der erwähnten Kreisteilung abgelesen. Bei Ausführung der Versuche müssen die gespannten Meßdrähte natürlich parallel zu diesen Kanten sein. Um dies zu ermöglichen, sind die Schieber mit mehr oder weniger seitlich stehenden Vorrichtungen zur Anhängung der Meßdrähte versehen. (Ernecke liefert den Apparat mit verschiedenen Nebenapparaten zu 100 Mk.)

Im folgenden ist die von Neu gegebene Gebrauchsanweisung mit einigen Kürzungen wörtlich abgedruckt.

„Die einfachste experimentell zu lösende Aufgabe über das Parallelogramm der Kräfte ist folgende: „Welche Kräfte K_1 und K_2 sind zur Haltung einer bestimmten Last L erforderlich, wenn jene Kräfte mit der Vertikalen die Winkel α und β bilden?"

Die betreffenden Versuche können zunächst in folgender Form ausgeführt werden. Nachdem man mit Hülfe der Stellschrauben dafür gesorgt, daß die Säule des Apparates, also auch der mit 0 bis 0° bezeichnete Durchmesser der Kreisteilung genau vertikal steht, bringt man die Arme in die durch die Winkel α und β bestimmte Stellung (Fig. 2157) und klemmt sie fest. Sodann hängt man an den gemeinsamen Ring der beiden Meßdrähte eine geeignete Vorbelastung und

[1]) Neus Tafel zur Demonstration des Kraftparallelogramms mit Meßdrähten wird geliefert von A. Bopp in München.

verstellt die Schieber, an welchen die Meßdrähte angehängt sind, so, daß jener Ring den Mittelstift des Apparates gleichmäßig umschließt (Meßstellung). Die Drähte sind an den Schiebern genau so weit seitlich befestigt, daß sie sich beim Zusammenlegen der Arme der Länge nach berühren.

Die Vorbelastung wird so groß gewählt, daß die Meßdrähte trotz ihrer von der Vertikalen abweichenden Richtung gerade gespannt sind, also keine merkbare Seilkurve bilden. Die Stellungen der Marken der beiden Schieber geben dann die Anfangsstellungen, von welchen aus die kraftmessenden Verlängerungen bestimmt werden. Hängt man jetzt die Last an, so ruht der Ring zunächst auf dem Mittelstift; man hat dann die Schieber so weit zu verstellen, daß der Ring wieder in Meßstellung kommt. Die Einstellung beider Schieber geschieht mit beiden Händen gleichzeitig. Wie man sieht, ist durch Anwendung der Vorbelastung das Eigengewicht der Meßdrähte eliminiert.

Eine allgemeinere zweite Form des Versuches erhält man, wenn man statt der Last einen dritten Meßdraht anbringt und diesen mittels eines zwischen den Schienen der Säule laufenden Schiebers auszieht. Man gibt zunächst einem der drei Meßdrähte eine beliebige Spannung und zieht hierauf die beiden anderen so weit aus, daß der Ring in Meßstellung kommt. Die Stellungen, welche die Marken der drei Schieber jetzt haben, geben die Anfangsstellungen. Sodann zieht man wieder einen beliebigen der drei Meßdrähte um ein bestimmtes Stück (etwa 10 cm) aus und stellt mit Hilfe der beiden anderen Meßdrähte neuerdings auf Meßstellung ein (Fig. 2158). Die das Gleichgewicht herstellenden Kräfte ergeben sich dann wie oben. Auch hier kommt das Gewicht der Meßdrähte in keiner Weise in Betracht.

Fig. 2158.

Dieses Gewicht ist jedoch im allgemeinen im Vergleich zur Größe der Last und der beiden Zugkräfte so klein, daß es ohne weiteres vernachlässigt werden kann, und dann werden die Versuche noch wesentlich einfacher.

Man stellt zunächst den ersten Arm vertikal aufwärts, entfernt den zweiten Meßdraht und bringt mit Hilfe des ersten Meßdrahtes den Ring, an welchem die Last (etwa 200 g), angehängt ist, in Meßstellung. K_1 ist dann bekannt $= L$ ($= 200$ g), mithin auch die Verlängerung des ersten Meßdrahtes (10 cm), so daß man aus der augenblicklichen Schlußstellung dieses Meßdrahtes die Anfangsstellung für $L = 0$ bestimmen kann (man hat einfach den Schieber um 10 cm tiefer zu stellen). Ganz in derselben Weise bestimmt man die Anfangsstellung des zweiten Meßdrahtes für $L = 0$.

Nachdem man so die Anfangsstellungen für die Vorbelastung $= 0$ gewonnen, verfährt man wie oben. Die Fehler wegen Nichtberücksichtigung der Meßdrahtgewichte sind, wie schon erwähnt, im allgemeinen so gering, daß sie innerhalb der Grenzen der Ablesungsfehler liegen. Erst wenn z. B. bei kleinem α der Wert von β nahe $= 90^\circ$ ist, werden die Fehler von K_2 merkbar, allein selbst dann immer noch nicht in dem Maße, daß die Messung den Anforderungen an einen Schulversuch nicht mehr genügen würde.

Sind in der erwähnten Weise die Anfangsstellungen einmal bestimmt, so können sie zur Ausführung der im nachstehenden beschriebenen Versuche immer wieder benutzt werden.

Bei der bisher behandelten einfachsten Aufgabe über das **Kräfteparallelogramm** sind von den in Betracht kommenden Größen gegeben: die Last (Resultante) L und die Winkel α und β, welche die Zugkräfte (Komponenten) mit der Vertikalen (Richtung der Resultante) bilden; gesucht sind die Zugkräfte (Komponenten) K_1 und K_2 selbst (Fig. 2159).

Es kommen nun noch folgende Aufgaben in Betracht:

1. Gegeben	L, K_1	und	K_2;	gesucht	α und β;
2. „	L, K_1	„	α;	„	K_2 „ β;
3. „	L, K_1	„	β;	„	K_2 „ α;
4. „	K_1, K_2	„	$(\alpha + \beta)$;	„	L, α „ β.

Die erste dieser Aufgaben wird, wie leicht zu übersehen, durch direktes Probieren gelöst, indem man beide Arme gleichzeitig, jedoch unabhängig voneinander, dreht. Die Einstellung vollzieht sich außerordentlich rasch.

Bei der experimentellen Lösung der zweiten Aufgabe wird zunächst statt des zweiten Meßdrahtes ein fester Seidenfaden benutzt. Die richtige Stellung des betreffenden Schiebers, welche unveränderlich ist, da der Seidenfaden keine Verlängerung erfährt, erhält man leicht, wenn man den zweiten Arm zuerst vertikal stellt und den ersten Meßdraht abspannt. Hat man L angehängt, den ersten Arm auf den

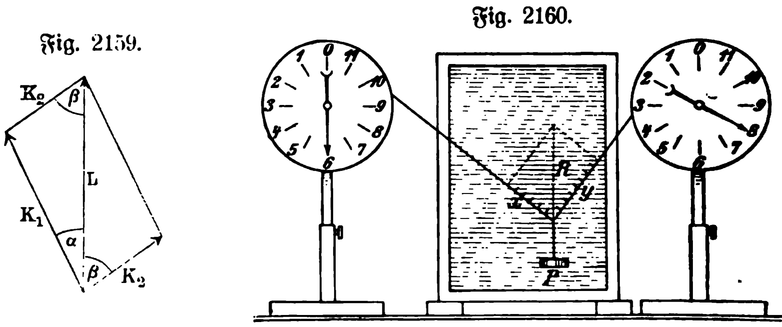


Fig. 2159. Fig. 2160.

Winkel α und den Schieber desselben auf K_1 eingestellt, so ergibt sich, weil man für die richtige Größe von K_2 nicht zu sorgen braucht, rasch die richtige Stellung des zweiten Armes, also die Größe des Winkels β, und sodann nach Ersetzung des Seidenfadens durch den zweiten Meßdraht auch die richtige Größe von K_2.

Zur Lösung der dritten Aufgabe ersetzt man, wie bei der zweiten, den zweiten Meßdraht zunächst durch einen festen Seidenfaden, bestimmt durch Drehen des ersten Armes zuerst die Größe des Winkels α und dann nach Wiedereinfügung des zweiten Meßdrahtes die Größe von K_2.

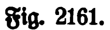
Je nach der für die Größen L, K_1 und β getroffenen Wahl (je nachdem nämlich $K_1 \gtreqless L \sin \beta$) läßt diese Aufgabe bekanntlich zwei, eine oder keine Lösung zu. Die Vorführung dieser verschiedenen Fälle auf entsprechender Unterrichtsstufe dürfte eine wünschenswerte Illustration der betreffenden geometrischen Beziehungen abgeben.

Bei der vierten Aufgabe, **Zusammensetzung zweier Kräfte von bestimmter Richtung**, wird zunächst der Zug der zu bestimmenden Last (Resultante) durch einen unveränderlichen Seidenfaden ausgeübt und durch gleichzeitiges und gemeinsames Drehen der auf den Winkel $(\alpha + \beta)$ eingestellten Arme die Bestimmung von α und β erzielt, worauf die Größe der Last (Resultante) durch Ersetzung des

Seidenfadens mit einem dritten Meßdraht gemessen, oder durch successive Anhängung immer größerer Gewichte herausprobiert werden kann.“

Neu machte noch besonders auf einige spezielle Fälle aufmerksam, auf die Zerlegung in zwei zueinander senkrecht stehende Komponenten.

Kleiber (Z. 17, 143, 1904) benutzt zu gleichen Zwecken die von ihm konstruierte Federwage nach Anleitung von Fig. 2160.


Fig. 2161.

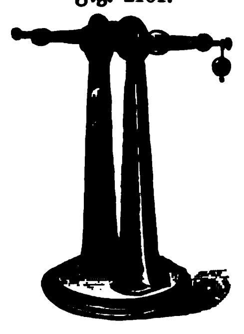


Fig. 2162.



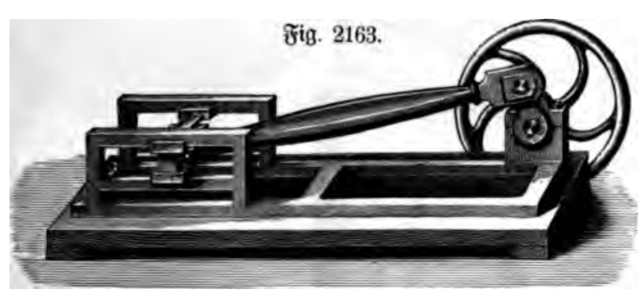

Fig. 2163.

Fig. 2164.

Fig. 2165.



50. Sprossenrad und Kurbel. Um ein Rad direkt mit der Hand umdrehen zu können, wird es am Umfang mit Handgriffen versehen. Ein bekanntes Beispiel ist das Steuerrad auf Schiffen. In einfacheren Fällen dient nur ein Griff, an Stelle des Rades tritt die Kurbel. (Fig. 2161 Lb, 9,50.) Die Welle kann auch als Zahnrad (Trieb) ausgebildet sein und in eine Zahnstange eingreifen (Fig. 2162 E, 55).

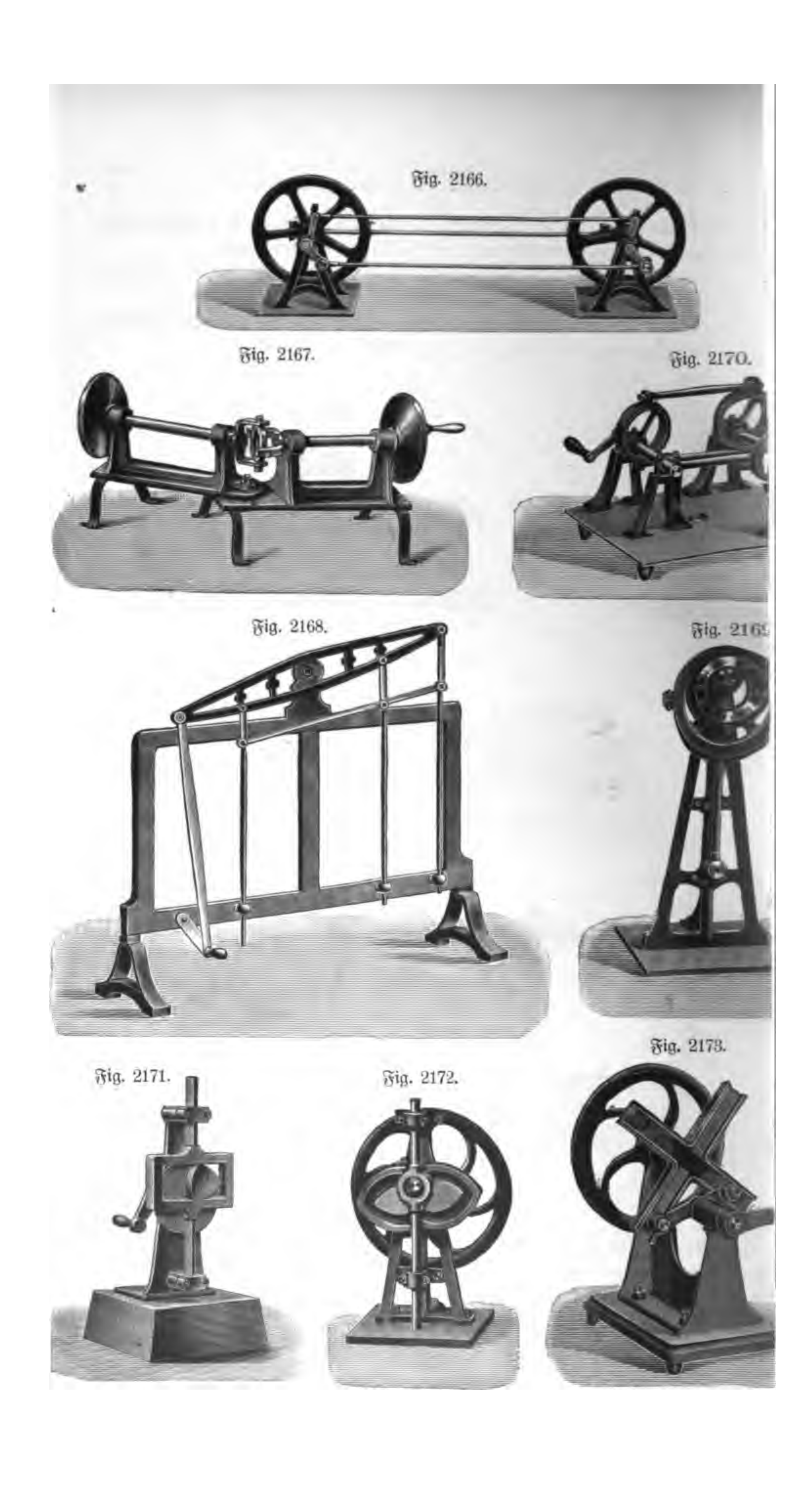

Fig. 2166.

Fig. 2167.

Fig. 2170.

Fig. 2168.

Fig. 2169.

Fig. 2171.

Fig. 2172.

Fig. 2173.

Fig. 2174.



Fig. 2177.

Fig. 2175.



Fig. 2176.



Fig. 2178.

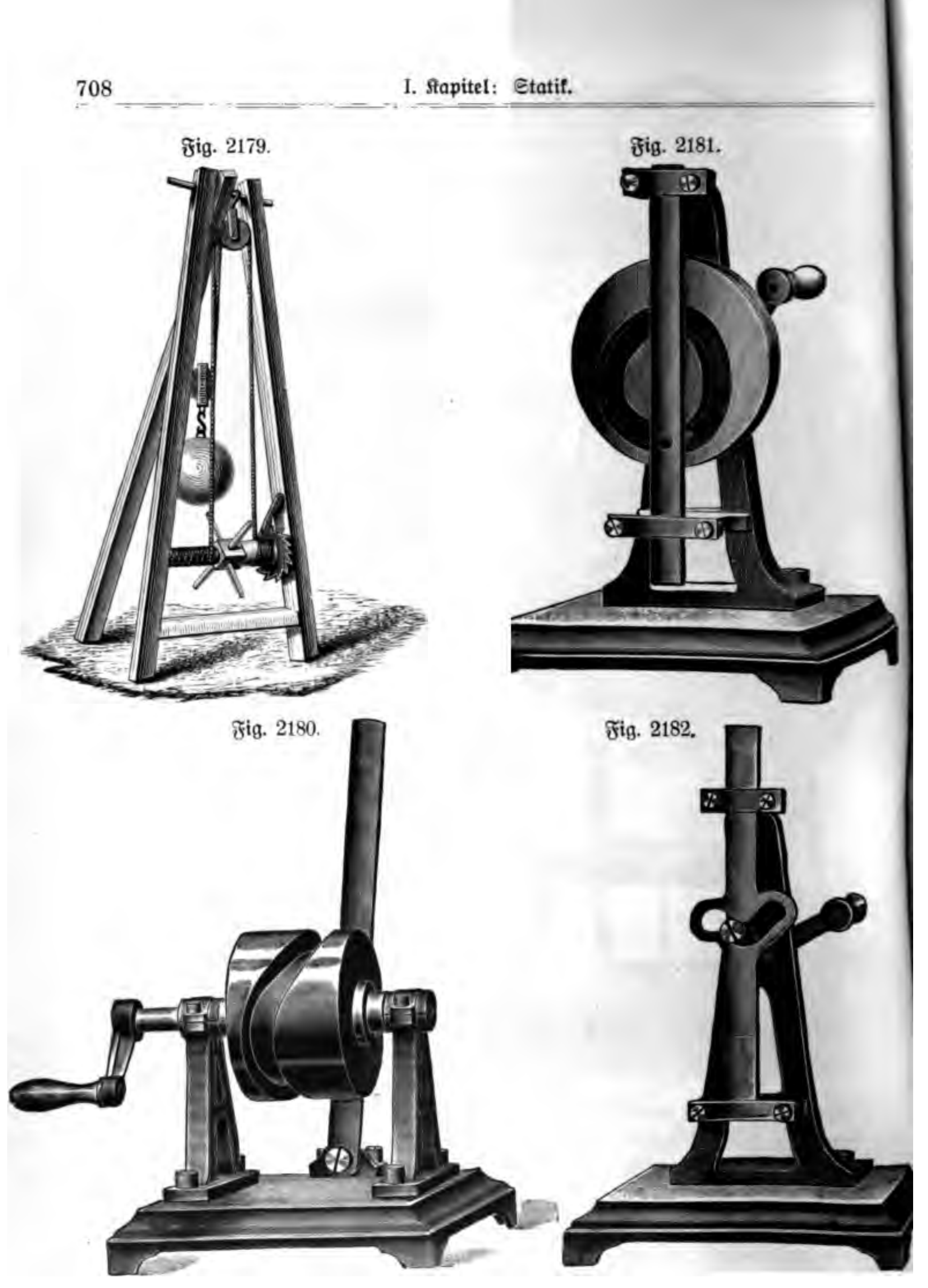


Verschiedenartige Kurbelmechanismen[1]) sind dargestellt in den Fig. 2163 E, 100; 2164 K, 55; 2165 E, 33; 2166 E, 125; 2167 E, 45; 2168 E, 38; 2169 E, 55; 2170 E, 140; 2171 E, 50; 2172 E, 90; 2173 E, 82; 2174 Lb, 120. Ferner gehören hierher Haspel, Winden (Fig. 2175; 2176 K, 16,50; 2177 Lb, 150) und Gegenwinde (Fig. 2178 Lb, 17).

Der Dreibock mit Gewinde (Fig. 2179) ist um so geeigneter für Erläuterung einer zusammengesetzten Maschine, da er häufig gebraucht wird, wenn auch nicht immer mit Gegengewinde, und sich leicht herstellen läßt.

Verschiedene Modelle von Zahnradgetrieben sind

[1]) Modelle von exzentrischer Nut-, Fig. 2180 und Exzenterbewegung nach Fig. 2181 und 2182 liefert G. Lorenz in Chemnitz zu je 25 Mk.


Fig. 2179. Fig. 2181. Fig. 2180. Fig. 2182.

a. S. 655 in den Figuren 2043 K, 50, 2044 E, 48, 2045 E, 100 und 2046 Lb, 15 dargestellt[1]).

Eine sehr große Auswahl von Räderwerken und ähnlichen Modellen liefert das Arbeitsinstitut von J. Schröder in Darmstadt, Sandstraße 38. (Illustriertes Preisverzeichnis zu 3 Mk.)

[1]) Eine Menge anderer einfacher Mechanismen, insbesondere solcher, die zu Räderwerken gebraucht werden, findet man beschrieben in: H. T. Brown, „507 Bewegungsmechanismen". Stuttgart, Cotta, 1886.

Die Fuhrmannswinde. Anstatt sich hierzu ein Modell anzuschaffen, wird man besser tun, eine gute Winde selbst (von der kleinsten Sorte) zu kaufen und das Deckblech der Räder je nach der Konstruktion entweder so durchhauen zu lassen, daß man Rad und Getriebe sehen kann, oder wenn dieses nicht angehen sollte, das Blech zum Aufschrauben einrichten zu lassen, während es gewöhnlich aufgenietet ist. Man kann nämlich eine solche Winde auch sonst brauchen und sie kostet nicht mehr als ein Modell. (Fig. 2183, Sonnenthal, Berlin, 38 Mk.)

Fig. 2183.



Ein Modell einer Bockwinde, bezw. eines Kranes zeigen die Fig. 2184 K, 39 und 2185 E, 105.

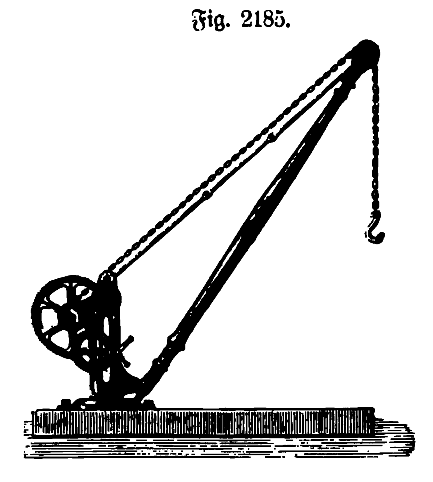
Man kann darauf aufmerksam machen, daß es nicht zweckmäßig ist, die Kurbeln an einer Winde einander entgegengesetzt anzusetzen, weil dadurch das Seil bei jeder Umdrehung entsprechend den toten Punkten zweimal einen Ruck erhält, durch welchen das Seil leidet und überdies die Arbeiter sich unnötiger Weise quälen.

51. Das Knie.

Die Anwendung des Parallelogramms der Kräfte bei der sogenannten Kniepresse kann durch den in Fig. 2186 und Fig. 2187 abgebildeten Apparat erläutert werden. Auf dem Brettchen MN ist die senkrechte Säule AB durch eine Schraube befestigt; an ihr können die Rolle C, sowie der Hebel IH mittels Hülsen mit Stellschrauben verschoben werden, so daß bei jeder Stellung des Knies der Hebel sowohl als die

Fig. 2184.

Fig. 2185.



Schnur a eine horizontale Richtung erhalten. Die Schnur ist mittels eines Bügels an die bei D befindliche Achse angehängt. Sind die Stäbe ED, DF an ihren Gelenken hinlänglich sicher und leicht beweglich, so kann man aus dem in die Wagschale e gelegten Gewichte, sowie aus dem Verhältnisse der Linien aD und DE die Seitenkraft DE, und aus dem Hebelverhältnis das bei H erforderliche Gewicht berechnen, da DE beim Versuche beinahe senkrecht auf IH wirken soll. Eines der Gelenke muß so gearbeitet sein, daß die Stäbe DE, DF die senkrechte Stellung nicht überschreiten können. (Fig. 2188.)

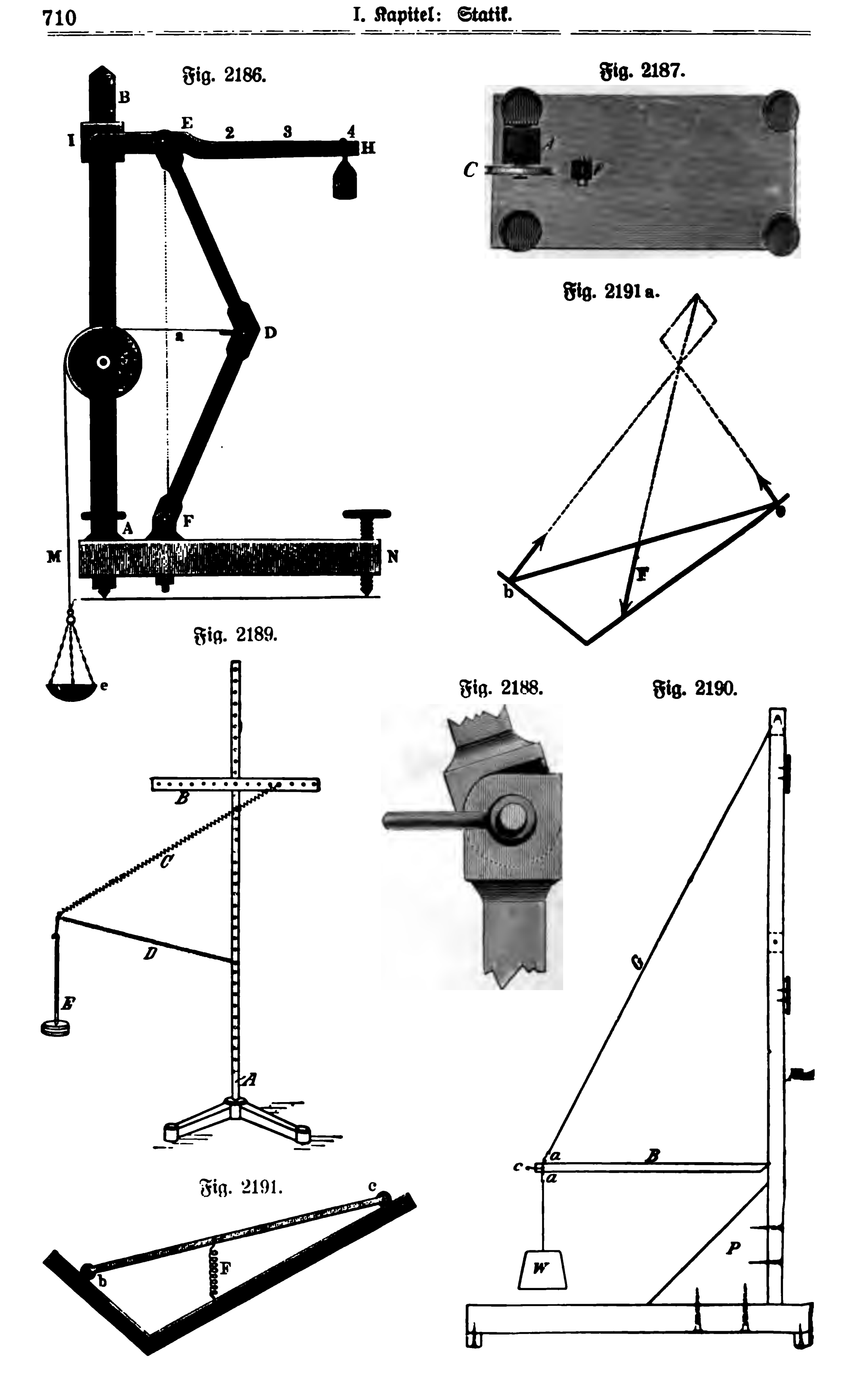


Fig. 2186.

Fig. 2187.

Fig. 2191 a.

Fig. 2189.

Fig. 2188.

Fig. 2190.

Fig. 2191.

52. Stabsysteme. An diesen Versuch kann man die Konstruktion des sogenannten Kräfteplans eines Fachwerks anschließen[1]).

Daß an Auflageflächen ein Gegendruck wirkt, demonstriert Neu durch eine Abänderung der S. 702 beschriebenen Experimente über das Kräfteparallelogramm. Statt des Ringes, an welchem die beiden Meßdrähte und die Last aufgehängt werden, kommt eine kleine Messingwalze mit drei leicht beweglichen Scheren zur Verwendung. Von diesen Scheren dienen zwei zur Anbringung der Meßdrähte, die dritte zur Anhängung der Last. Die Einrichtung ist so getroffen, daß die Walze auf einer fest angebrachten Metallplatte ruhen kann, ohne daß die nach unten hängende dritte Schere anstreift oder sonst hinderlich ist.

„Die Einstellung der Meßdrähte geschieht dann jedesmal so, daß die Walze die Mitte der Platte nahezu berührt. Bei dieser Stellung geht die Verlängerung der Achse der Walze gerade in die Bohrung des Befestigungszapfens, aus welcher der bisher gebrauchte Meßstift entfernt wurde. Von jetzt an repräsentiert also die Mitte jener Achse den gemeinsamen Angriffspunkt der drei Kräfte.

Die ganze Durchführung des Versuches entspricht zunächst genau derjenigen, welche anfänglich beschrieben wurde; das Gewicht der Walze mit Scheren gilt dabei als Vorbelastung.

Ist nun nach Anbringung der Last die Walze durch Verstellung der Schieber wieder in Meßstellung gebracht und die Größe von K_1 und K_2 bestimmt, so wird der erste Meßdraht durch Zurückstellung des ersten Schiebers außer Tätigkeit gesetzt: die Last ruht dann auf der Metallplatte, ohne daß der Gleichgewichtszustand gestört wird. Die erste Zugkraft K_1 wird also vollständig ersetzt durch den nicht arbeitsfähigen Druck, welchen die Platte in entgegengesetzter Richtung gegen die Walze, bezw. den Angriffspunkt der Kräfte, ausübt. Man schließt demnach, daß von den zur Haltung der Last nötigen Kräften K_1 und K_2 die eine, hier K_1, ohne Änderung der anderen, K_2, durch den toten Druck einer festen Widerlage ausgeübt werden kann, deren Ebene auf der Richtung von K_1 senkrecht steht.

Die Größe des von der Platte ausgeübten Druckes, bezw. des Druckes der Last auf die Platte, kann durch Anspannen des ersten Meßdrahtes augenblicklich wieder bestimmt werden."

Grimsehl (Z. 16, 260, 1903) empfiehlt den in Fig. 2189 dargestellten, von A. Krüß, Hamburg, Adolphbrücke 7, zu beziehenden Apparat, bei welchem das Gewicht E auf die Federn C und D wirkt, deren letztere im Innern zum Schutz gegen Verbiegung eine steife Stange enthält, die sich in eine enganschließende Hülse einschiebt.

Woodruff (Z. 16, 289, 1903) verwendet zu gleichem Zwecke den in Fig. 2190 dargestellten Apparat, wobei an den Haken C horizontal eine Federwage angesetzt und so gespannt wird, bis der Stab B aus der Kerbe der Stange M herausfällt. Man erfährt den Druck in dieser Stange. Der Zug in dem Faden G wird ebenfalls mit einer Federwage bestimmt. Ein anderer hierher gehöriger Versuch ist der folgende.

Ein angelehnter Stab bc (Fig. 2191), welcher durch die Feder F gegen die Schenkel eines Winkels gedrückt wird und ohne Reibung längs diesen gleiten kann, ist im Gleichgewicht, wenn die Auflagedrucke bei b und c senkrecht sind und

[1]) Siehe Lorenz, Lehrb. d. techn. Physik, S. 295. München, R. Oldenbourg, 1902.

ihre Richtungen sich schneiden in einem Punkte, welcher auf der Verlängerung von F liegt, wie durch die punktierten Linien in Fig. 2191 a dargestellt ist.

Ein Spezialfall ist das Gleichgewicht einer an eine Mauer gelehnten Leiter.

Von besonderem Interesse ist der in Fig. 2192 dargestellte Flaschenverschluß. Der Hebel DCB dreht sich um den Punkt B und wirkt auf die Stange AC, welche sich um beide Enden drehen kann und infolge des in ihr auftretenden Zuges den Stöpsel A in die Flasche hineindrückt. Diese Zugspannung P zusammen mit der in CB auftretenden Druckspannung Q ergibt ein Parallelogramm, dessen Diagonale R den bei D ausgeübten Druck darstellt.

Auf ein eigentümliches Stabsystem, welches durch Fig. 2193 dargestellt ist, macht W. Holtz (Z. 15, 89, 1902) aufmerksam. Er nennt dasselbe Skeletthebel, insofern eine gewisse Analogie zu den Rippen des Körpers besteht. Die beiden Stäbe werden durch ein Kautschukband gegeneinander gedrückt und stellen sich nach oben oder unten ein je nach der Schiefe jenes Kautschukbandes.

Fig. 2192.



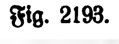
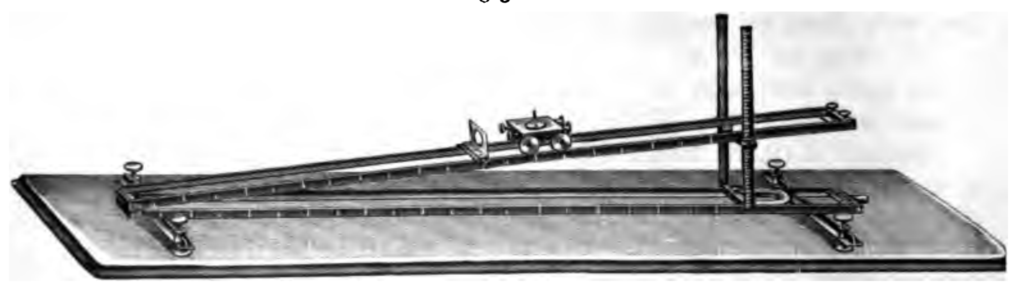

Fig. 2193.



Fig. 2194.



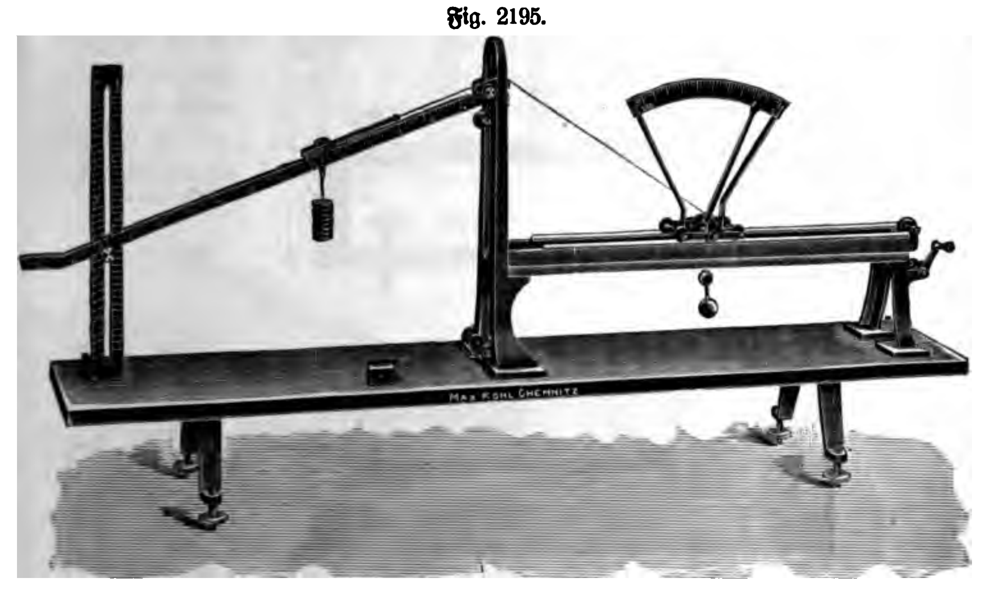
53. Die schiefe Ebene. Die Vorrichtung, welche ich selbst benutze, gleicht dem in Fig. 2194 dargestellten Apparate von Höfler (Z. 7, 276, 1894). Ein Wagen mit leicht gehenden Rädern gleitet auf glatten Eisenschienen von 4 m Länge, deren Neigung nach Wunsch geändert werden kann. Bei Höflers Apparat beträgt die Länge der schiefen Ebene nur 125 cm.

Zur Messung der Kraft benutzt Hartl, wie Fig. 2195 (K, 275) zeigt, ein Dynamometer.

Bei Benutzung des Apparates von Neu zur Demonstration des Kräfteparallelogramms kann man ohne weiteres auch das Gesetz der schiefen Ebene erklären. In der Tat ist der zuletzt besprochene Versuch (S. 704) auch der Fundamentalversuch für das Gesetz von der schiefen Ebene.

Der Winkel α, welchen der erste Arm, also K_1, mit der Vertikalen bildet, ist offenbar der Neigungswinkel der durch die Metallplatte dargestellten schiefen Ebene. Die Richtung von K_2, bestimmt durch den Winkel β des zweiten Armes mit der Vertikalen, ist zunächst noch ganz beliebig. Wählt man $\beta = 90 - \alpha$, so hat man den einfachsten Fall, daß K_2 parallel zur schiefen Ebene. Für $\beta = 90^0$ wird K_2 parallel zur Basis der schiefen Ebene. Nimmt man β ganz beliebig $= n^0$, so bildet K_2 mit der schiefen Ebene oder mit der Basis leicht zu bestimmende Winkel. Für

Fig. 2195.



den Fall $\beta = 90^0 - \alpha$, also K_2 parallel zur schiefen Ebene, läßt sich bei Fortbewegung des zweiten Schiebers, etwa um 1 cm, noch konstatieren, daß auch die lasttragende Walze auf der Metallplatte um 1 cm fortrollt, daß also die Größe von K_2 unabhängig ist von dem Orte der Last auf der schiefen Ebene.

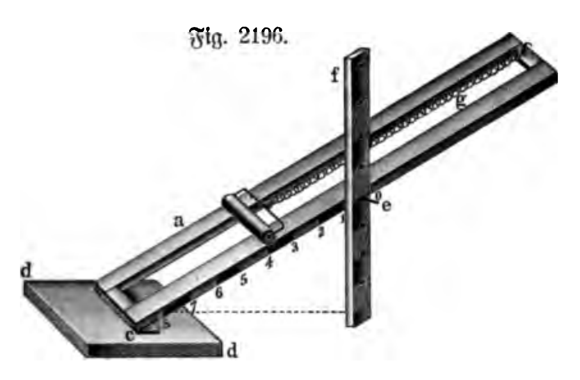


Fig. 2196.

Kellermann (Z. 17, 161, 1904) verwendet eine Federwage nach Fig. 2196.

Einen älteren Apparat zeigt Fig. 2197. Die schiefe Ebene, sowie die darauf zu legende Walze muß von Metall sein, und sich durch eine Druckschraube in jeder Stellung befestigen lassen; die Walze dreht sich leicht an den stählernen Spitzen zweier Schrauben, die in dem messingenen Rahmen *ab*, Fig. 2197 und 2198, ihren Sitz haben. Das Stück *def* enthält auf der Seite *de* eine Teilung in Prozenten der Grundlinie, und auf *ef* entweder eine Teilung in Graden oder in Prozenten der Länge der schiefen Ebene. Letztere Teilung ist als eine ungleiche allerdings schwerer aufzutragen, und man tut im allgemeinen besser, das erforderliche Gegengewicht aus dem bekannten Gewicht der Walze und dem Dreieck *mno* zu berechnen.

Fig. 2197.

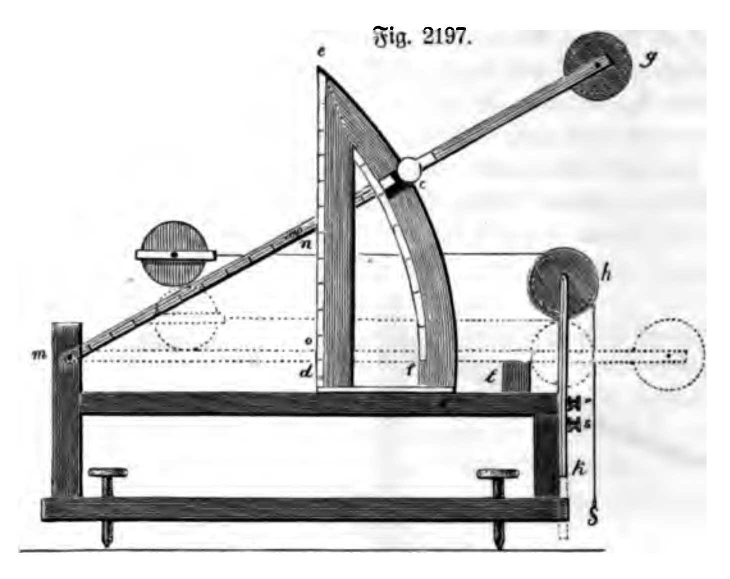


Fig. 2198.

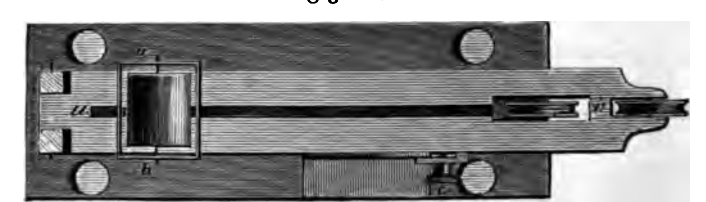


Fig. 2199.

Fig. 2200.

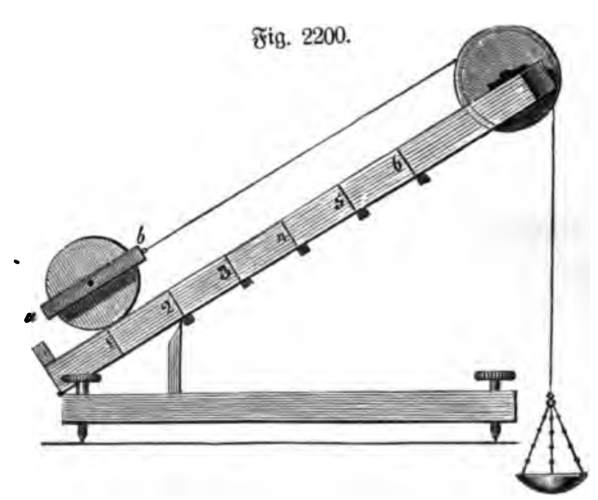
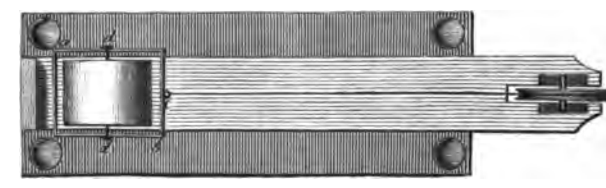


Fig. 2201.



Wirkt das Gegengewicht über die Rolle *g*, so wird es der Walze auf jedem Punkte der schiefen Ebene Gleichgewicht halten; allein wenn es parallel mit der Grundfläche wirken soll, so findet dieses nur auf jener Stelle der schiefen Ebene statt, wo die über die Rolle *h* gehende Schnur horizontal steht; diese Rolle wird von der geschlitzten Messingschiene *ik* getragen (Fig. 2199) und läßt sich durch die Schrauben *r*, *s* in verschiedenen Stellungen befestigen, wodurch aber der erwähnte Umstand nicht geändert wird. Die schiefe Ebene selbst hat für diesen Fall einen Schlitz, um die Schnur horizontal durchzulassen.

Es empfiehlt sich auch das alte Experiment zu zeigen, daß **eine endlose, um eine schiefe Ebene geschlungene Kette im Gleichgewicht ist,** obschon zu beiden Seiten des höchsten Punktes verschieden lange Stücke der Kette ziehen, daß also auf solche Weise ein Perpetuum mobile nicht erhalten werden kann.

54. **Flugwerk.** Ein Modell, welches das sogenannte Flugwerk in Theatern vorstellt, zeigen die Fig. 2208 und 2209; *MN* ist ein vertikales Brettchen mit einem Fuße *OP*; rechtwinklig zu *MN* ist das Brettchen *RS* befestigt und durch zwei Stützen *a*, *b* getragen. Dieses Brettchen ist in der Mitte der Länge nach geschlitzt und hat parallel mit diesem Schlitze zwei Nuten. An einem Klötzchen *cd* sind vier Laufrollen angebracht, welche in den Nuten von *RS* sich bewegen; außer diesen vier Rollen befindet sich mitten im Klötzchen in einem Schlitze eine fünfte, welche oben etwas hervorragt; über diese und die Rolle *f* ist eine bei *g* befestigte Schnur geschlungen, welche das Gewicht *h* trägt. Wird nun mittels der bei *c* am Klötzchen befestigten, über die Rolle *e* laufenden Schnur *i* dieses über das Brettchen *RS* weggezogen, so steigt zugleich das Gewicht *h* nach der Diagonale *mo* des

Fig. 2208. Fig. 2209.

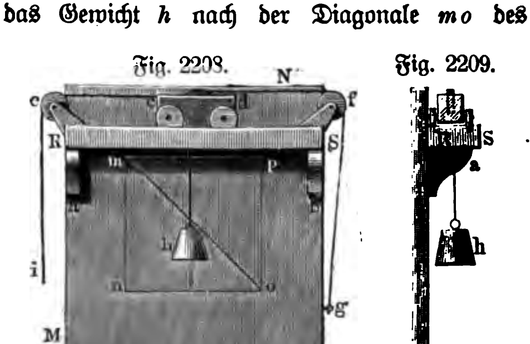
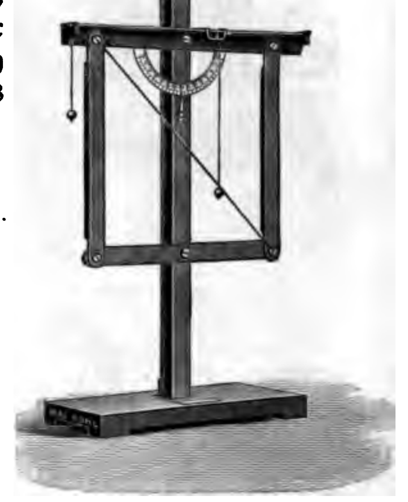


Fig. 2210.



Parallelogramms *mnop*. Man kann sich übrigens zu gleichem Zwecke einfach eines zwischen zwei Stäben befestigten Drahtes bedienen, an welchem man von Hand einen Ring verschiebt, durch den ein an einem der Stäbe befestigter Bindfaden geht, der ein Gewicht trägt.

Stöhrer hat diesen Apparat noch in der Weise abgeändert, daß er das Stativ aus einem beweglichen Rahmen bildet (Fig. 2210 K, 40).

Der Apparat zeigt sehr deutlich, den bei allen bisher behandelten Fällen von gezwungener Bewegung zutage tretenden Satz, daß eine Arbeit somit auch die erzeugte potentielle Energie nur dann durch das Produkt und den Weg gemessen wird, wenn Kraftrichtung und Weg zusammenfallen, daß dagegen noch mit dem Kosinus des Winkels zwischen beiden multipliziert werden muß, d. h., daß nur der in der Kraftrichtung zurückgelegte Weg in Betrachtung kommt, falls die Richtungen nicht übereinstimmen.

55. **Apparat zur Demonstration des Brechungsprinzips** (Fig. 2211). Dieser von Mach konstruierte Apparat (von Dr. Houdek und Hervert in Prag zu beziehen) besteht aus zwei ungleich hohen polierten Holzständern mit Schlitzen,

so halten 30 g in der Zugschale einer Last von 50 das Gleichgewicht, wenn die Schnur parallel läuft, dagegen nur 40 bei horizontalem Zug. (E, 85.)

Jacob (Z. 4, 193) empfiehlt eine Vorrichtung, bei welcher mittels einer über Rollen geführten belasteten Schnur der Druck des Körpers senkrecht zur schiefen Ebene kompensiert wird. Ähnlich v. **Follern** (Fig. 2205 E, 75).

Warmbrunn, Quilitz u. Comp. in Berlin bringen ein einfaches Modell der schiefen Ebene in den Handel, bei welchem die schiefe Ebene aus Glas besteht. Es hat dies den Vorzug, daß das Experiment von allen Seiten gleich gut über-'hen werden kann. (W, 48.)

Fig. 2205.



Fig. 2206.

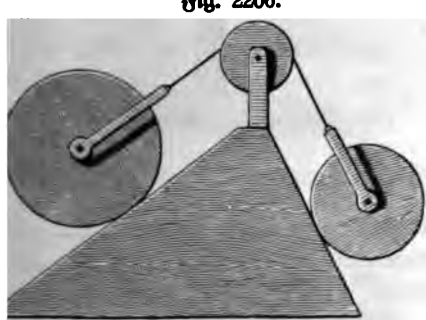
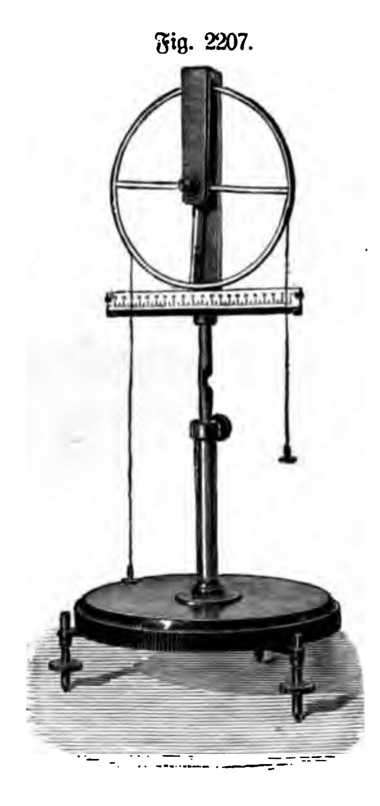


Fig. 2207.



Andere einfache Modelle der schiefen Ebene hat man z. B. hergestellt aus iem schief gespannten Seidenfaden oder einer Klaviersaite, auf welcher ein leichtes ögelchen herunterrollt.

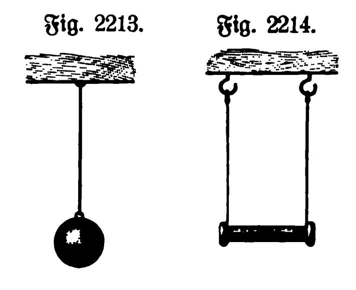
Eine beständig fertige Vorrichtung, um das Gesetz der schiefen Ebene darzustellen, gt Fig. 2206. Die beiden Walzen halten sich Gleichgewicht, wenn ihre Gewichte h verhalten, wie die Längen der zugehörigen schiefen Ebenen. (W, 5.)

Johannesson (Z. 11, 257, 1898) macht darauf aufmerksam, daß man, wie on **Galilei** getan, das Gesetz der schiefen Ebene auch aus dem Gesetz des inkelhebels ableiten kann. Er gibt dem letzteren die Form Fig. 2207 (E, 110) **ladwage**). Die Schnur links zieht an einem Punkt, der sich gewissermaßen auf er schiefen Ebene, nämlich an der Tangente des Rades an der betreffenden Stelle wegen kann, und die Kraft dieser Bewegung wird gemessen durch die Belastung r Schnur auf der rechten Seite.

56. Pendel, bifilare und kontrafilare Aufhängung. Wird an einem schweren Pendel an langer Schnur (Fig. 2213) eine Schnur angebracht, an welcher in horizontaler Richtung eine Kraft wirkt, so wird das Pendel abgelenkt, und zwar erweist sich die Elongation der Kraft nahezu proportional.

Ähnliches gilt für eine bifilar aufgehängte Stange (Fig. 2214), wenn dieselbe durch zwei an den Enden angreifende horizontale Kräfte aus ihrer Gleichgewichtslage herausgedreht wird. Und ähnlich bei der kontrafilaren Aufhängung, bei welcher der Schwerpunkt des Körpers nicht zwischen den Aufhängefäden, sondern außerhalb liegt, und zwar zunächst bei dem der nach oben gehenden Schnur. (Fig. 2215 K, 20.)

Fig. 2213. Fig. 2214.



Bei allen diesen Aufhängungsarten bewegt sich nämlich der abgelenkte Körper auf einer schiefen Fläche aufwärts, deren Neigung mit steigender Ablenkung immer mehr zunimmt. Gleiches ist der Fall bei einer in einer Schüssel rollenden Kugel.

Neu weist darauf hin, daß mittels seiner Meßdrähte auch folgende Aufgabe behandelt werden kann.

Fig. 2215.

„Ein mit dem Gewichte L belasteter Faden wird an einer beliebigen Stelle gepackt und durch eine horizontale Kraft K_1 zur Seite gezogen; man soll die Spannung (K_2) und die Richtung (β) des oberen Fadenstückes bestimmen.“

57. Der Keil. Zur Erläuterung der Lehre vom Keil kann die einfache Vorrichtung Fig. 2216 angewendet werden. Sie besteht aus einem Grundbrettchen *cc*, das mittels vier Schrauben am Rande des Tisches horizontal gestellt werden kann und in welches zwischen Stützchen aus starkem Messingblech die Walze *a* zum Teil eingelassen ist; außerdem befindet sich an dem Brettchen die leicht bewegliche Rolle *r*. Diese Rolle ragt mit ihrem Schnurlauf über den Rand des Brettchens hinaus, um der Wagschale *w* freien Spielraum zu lassen. An der Stütze *v* befindet sich mittels eines gewöhnlichen Gelenkbandes oder an einem Nagel das Brettchen *ss* mit der Walze *b*, welche durch ein beliebiges Gewicht *P* gegen die Walze *a* gedrückt wird. Zwischen beiden wird der Keil *k* an der Schnur *ll* gehalten. Solcher Keile hat man mehrere von verschiedener Basis bei gleicher Länge.

Der Druck des Brettchens *ss* samt der Walze *b* wird dadurch bestimmt, daß man es mittels einer Schnur an eine gemeine Wage befestigt und in die andere Schale so lange Gewicht legt, bis das Brettchen an seinem Gelenke horizontal steht. Dieses Gewicht wird auf das Brettchen *s* notiert und ist jedesmal zu *P* zu addieren. Gut ist es, dieses Gewicht so zu regulieren, daß es eine beliebige ganze Zahl der Ein-

---

Stab *a b c* befestigt sind. Dreht man diesen, so verschieben sich die Marken *f* und *g* derart, daß der Weg der ersteren doppelt so groß ist. Der Fall entspricht also der Brechung eines Lichtstrahls an der Grenze zweier Medien, deren Brechungsquotienten im Verhältnis 1 : 2 stehen. Siehe auch Z. 5, 139, 1892.

ten beträgt, mit welchen man gewöhnlich solche Versuche macht, z. B. eine ganze hl Gramme.

In die Wagschale *w* kommt beim Versuche das vorher nach dem angewendeten le berechnete Gewicht, so daß der Keil das Brettchen *ss* ebenfalls horizontal er- t. Die Walzen erhalten eine Länge von 3 bis 6 cm. Die Reibung ist immer

Fig. 2216.



Fig. 2217.

sehr groß und die Resultate werden darum nicht sehr der Rechnung entsprechend, selbst wenn man metallene Walzen und Keile nimmt. (E, 12.)

Neumann verwendet statt des massiven Keils zwei durch ein Scharnier verbundene und durch ein zwischengelegtes Holzklötzchen getrennt gehaltene Brettchen, so daß man den Winkel des Keils durch Verschieben des Klötzchens ändern kann [1]). (Dr. Houdek u. Hervert, Prag, Preis 15 fl.)

Benecke versieht den Keil mit zwei axialen Fortsätzen, welche über Rollen geführt sind. (E, 54.)

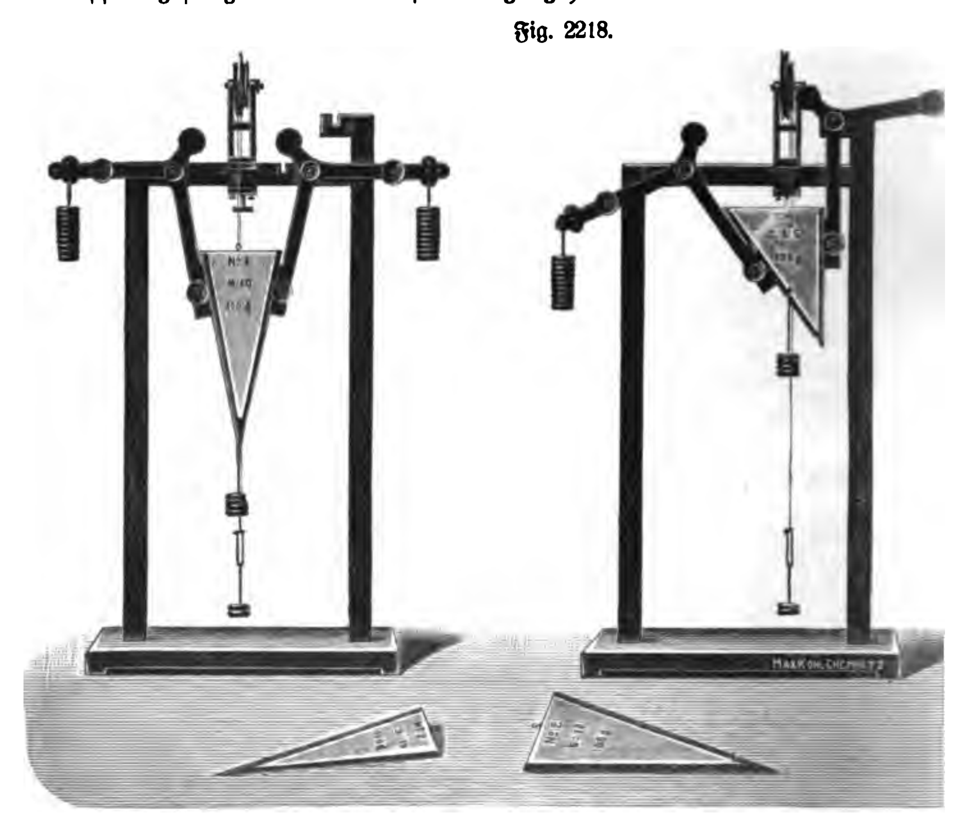
Hartl (Z. 5, 282, 1892) gestaltet den Keilapparat so, daß der Druck auf beiden Seiten des Keils gemessen werden n und zwar entweder durch Winkelhebel oder als Dynamometer wirkende Federn. r Apparat (Fig. 2218) ist zu beziehen von M. Kohl zu 45 bezw. 25 Mk.

Eine Anwendung des Keils bilden ferner die verstellbaren Parallelstücke Unterstützung von Körpern (zu beziehen von E. Sonnenthal, Berlin, Neue menade 6).

[1]) Ähnlich ist der Apparat Fig. 2217 vorgerichtet. Lb, 150.

58. Exzenter. Der Exzenter (Fig. 2169 E, 55) kann als Spezialfall Kurbel betrachtet werden (vergl. § 48, S. 705), aber auch als Keil, welcher eine Kreisscheibe gelegt ist. Fig. 2170 (E, 140), zeigt eine durch zwei Exzenter Kuppelungsstangen bewirkte Kraftübertragung[1]).

Fig. 2218.



59. Schraube. Daß die Schraube als ein um einen Cylinder herumgewicke Keil betrachtet werden kann, wurde bereits oben S. 642 durch ein Modell dargest

Wollte man wirkliche Schrauben benutzen, um die Theorie derselben durch wichte zu zeigen, so müßte man solche mit sehr großer Steigung wählen, und a dann noch wird die Reibung zu groß ausfallen. Indessen wird es immer gut s wenn man ein paar Modelle von flachgängigen und scharfgängigen, einfachen mehrfachen, auch linksgewundenen Schrauben nebst den zugehörigen zur Hälfte a geschnittenen Muttern hat.

Um an einem Modelle die Wirkung einer gewöhnlichen Schraube durch den V such zu zeigen, dürfte folgender, von J. Müller angegebener Apparat sehr zu er fehlen sein. Der Fuß MN, Fig. 2219, trägt einen massiven, gut abgedrehten Cylinde von hartem Holze, auf welchen ein hohl ausgedrehter, ebenfalls hölzerner Cylinder gesteckt werden kann, welcher bestimmt ist, das Gewicht C zu tragen; letzterer m aus besonders hartem und trockenem Holze gemacht sein und wird unterhalb

[1]) Durch mehrere gegen einander versetzte Kurbeln oder Exzenter wird größ Gleichförmigkeit der Kraftübertragung erzielt. Es empfiehlt sich hierauf hinzuweisen Rücksicht auf die spätere Behandlung der Kraftübertragung durch verkettete Wechselströ

Form einer Schraube abgeschnitten, was sich ziemlich genau machen läßt, wenn man zuerst ein Papier, wie in Fig. 2013, daraufklebt. Auf den massiven Cylinder werden dann etwa sechs Rollen *aa*... angeschraubt, so daß sie alle zugleich die Schraube stützen. Die Rollen laufen an Stahlspitzen, und Fig. 2220 zeigt eine solche in natürlicher Größe. Der Arm *D* trägt ebenfalls eine Rolle, über welche eine Schnur mit dem Gegengewicht reicht. Man gibt der Schraube eine starke Steigung und richtet diese zur Bequemlichkeit beim Versuche so, daß dieselbe ein einfaches Ver-

Fig. 2220. Fig. 2219.

Fig. 2222.

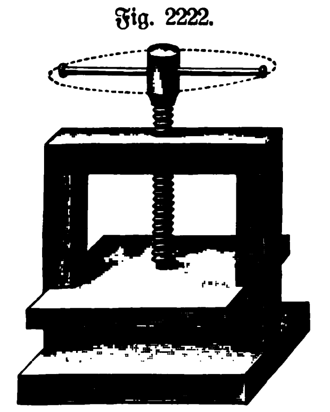
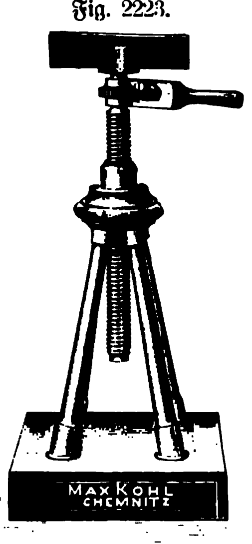


Fig. 2221.



Fig. 2223.



hältnis zum Umfange hat und etwa $1/4$ bis $1/3$ desselben beträgt. Der Gebrauch des Apparates bedarf keiner Erläuterung[1]. (W, 24.) Eine neuere Form zeigt Fig. 2221, Lb, 100.

Beispiele praktischer Verwendung sind die Schraubenpressen (Fig. 2222), die Schraubenwinde (Fig. 2223 K, 36), die Schraube ohne Ende (Fig. 2224 K, 30), und die Spannvorrichtung mit Rechts- und Linksgewinde (Fig. 2225

[1] Ein ähnliches Schraubenmodell nach Hartl (Z. 15, 318, 1902) ist zu beziehen von J. Katusch in Reichenberg zu 42 Mk.

E, 54). Ein großer Flaschenzug mit Schraube ohne Ende nach Lüders (Fig. 490 in Bd. I (1), S. 253) ist zu beziehen von E. Sonnenthal in Berlin C. 22, Neue Promenade 6, zu 104 Mk.

Dieselbe Firma liefert Bohrmaschinentische, welche durch eine Schraube gehoben werden (Fig. 567 in Bd. I (1), S. 262) zu 85 Mk. Ein solcher läßt sich bequem benutzen um zu zeigen, wie eine große Last durch eine kleine Kraft gehoben werden kann, besonders wenn man eine der Speichen der Schraubenmutter durch ein aufgestecktes Rohr verlängert.

Die Einrichtung einer Differentialschraubenwinde ist in Fig. 2226 dargestellt.

Fig. 2224.

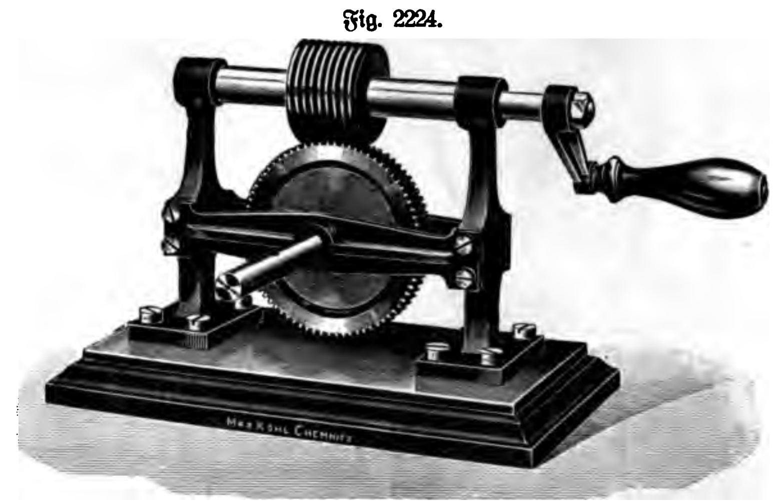


Fig. 2225.

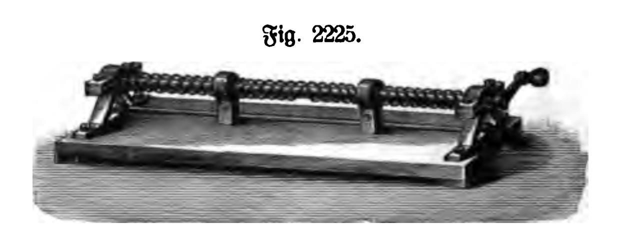


Fig. 2226.



60. Ausgedehnte Systeme. An die Besprechung des Keils und der Schraube kann man diejenige der Gewölbe, Sprengwerke, des Seil- und Kettenpolygons, der Maschinenelemente, der Zusammensetzung beliebig vieler auf einen festen Körper wirkender Kräfte, Parallelogramm der Drehungen u. s. w. anschließen, doch gehen diese Betrachtungen über den Rahmen der elementaren Physik hinaus [1]).

61. Niveauflächen und Kraftlinien. Aus dem Gesetz der gezwungenen Bewegung folgt, daß die Arbeit zum Heben eines Körpers stets die gleiche ist, mag

[1]) Siehe Gray, Lehrbuch der Physik, deutsch von Auerbach, Braunschweig 1904, Bd. I, und Lorenz, Lehrbuch der technischen Mechanik, München 1902.

er direkt senkrecht in die Höhe gehoben werden oder etwa auf einer Rampe (schiefen Ebene) oder auf einer Wendeltreppe, d. h. auf einer schraubenförmigen Bahn. Die erzielte potentielle Energie ist nur vom Ort abhängig, nicht von dem Wege, auf welchem dieser Ort erreicht wurde. Man kann sich deshalb an jeder Stelle einer Örtlichkeit, z. B. einer Anhöhe oder eines Berges, deren Wert angeschrieben und sodann aller Punkte gleicher potentieller Energie desselben Körpers, z. B. von einem Kilogrammstück, verbunden denken. Man erhält so die **Äquipotential-** oder **Niveaulinien.** In Fig. 2227 sind zwei derselben, entsprechend den Energiewerten P und $P + dP$, gezeichnet. Würde sich der Körper z. B. von 1 nach 2 bewegen durch die Strecke dS und bezeichnet

Fig. 2227.

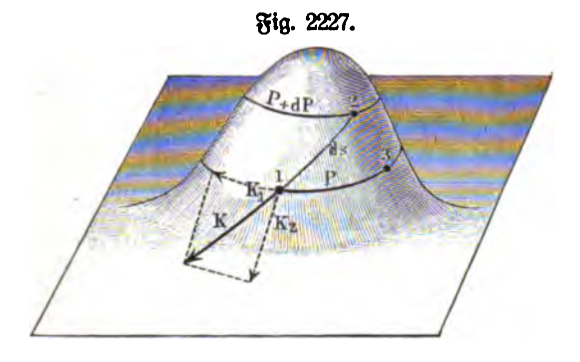


Fig. 2228.

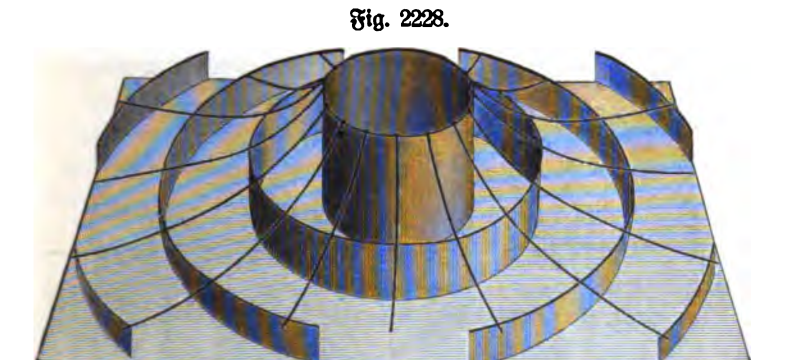
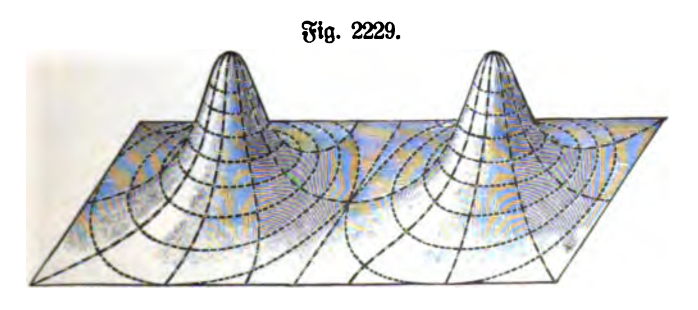


Fig. 2229.



K die auf ihn wirkende Kraft, so muß das Produkt $K.ds$ gleich sein der Energiezunahme dP. Wäre, wie in der Figur angenommen, die Kraft K schief zur Niveaulinie, so ließe sie sich nach dem Kräfteparallelogramm zerlegen in die Komponenten K_1 und K_2. Würde man nun den Körper von 1 nach 3 bringen, so wäre dabei die Kraft K_1 zu überwinden, also Arbeit geleistet werden, d. h. die Energie würde sich ändern. Dies ist aber nicht möglich, weil 3 auf der gleichen Niveaulinie liegt wie 1, somit muß K_1 gleich Null sein, d. h. K zur Niveaulinie senkrecht stehen. Dies gilt für jeden Punkt der Oberfläche des Berges, man hat also den Satz: „**die Kraftlinien** durchschneiden die Niveaulinien senkrecht“.

Hätte der Berg die Form eines Rotationskörpers, z. B. entstanden du
tation einer gleichseitigen Hyperbel um eine ihrer Asymptoten, wie Fig. 22
deutet, so wären die Niveaulinien Kreise, welche von oben betrachtet, einan
so näher rücken, je näher sie dem Zentrum kommen.

Wären zwei Berge gleichzeitig vorhanden, wie das Modell Fig. 2229 a
wobei für jede Stelle die Höhe, somit auch die Energie gefunden wird
Addition der den einzelnen Bergen entsprechenden Werte, so würde sich ein

Fig. 2230.

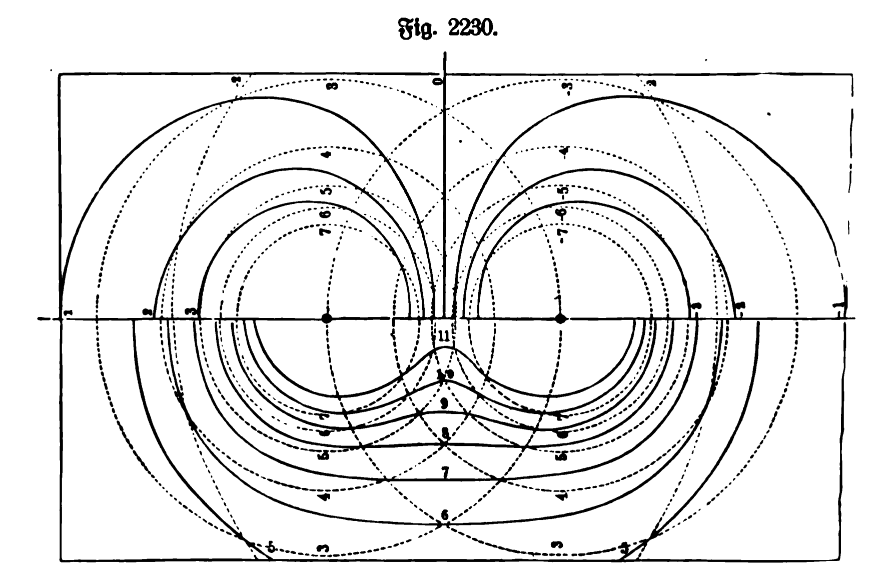
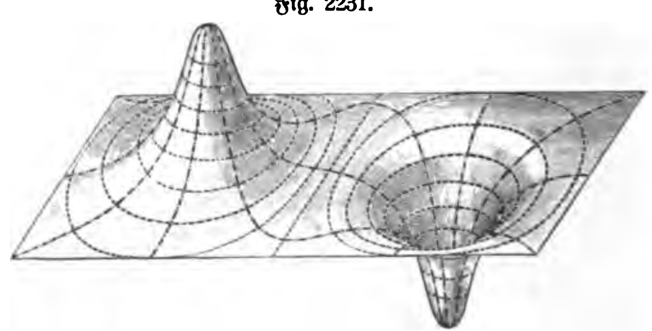


Fig. 2231.



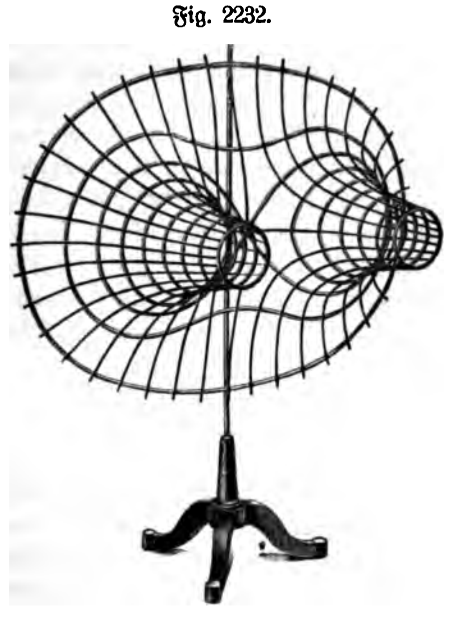
der Niveau- und Kraftlinien ergeben, wie es in Fig. 2230 angedeutet ist, und
wären die Niveaulinien, von oben gesehen, Lemniskaten, wie der untere Tei
Fig. 2230 zeigt.

Analog stellen das Modell Fig. 2231 und Fig. 2230 obere Hälfte den Be
der Kraft- und Niveaulinien für eine Kombination von Berg und Tal dar.

Ich habe diese Modelle aus Leinwand hergestellt. Martin Schill
Verlag von Modellen, Halle a. d. S., gestaltet dieselben nach Angaben von O. Wie
wie Fig. 2232 zeigt, aus Draht. Preis: ein Berg 40 Mk., zwei Berge oder
und Tal 80 Mk. Bewegt sich ein Punkt auf einer Schraubenfläche, Fig.
(Wendeltreppe), so sind die Niveaulinien von oben gesehen Radien (Kanten
Treppenstufen), die Kraftlinien konzentrische Kreise. Eine größere Zahl

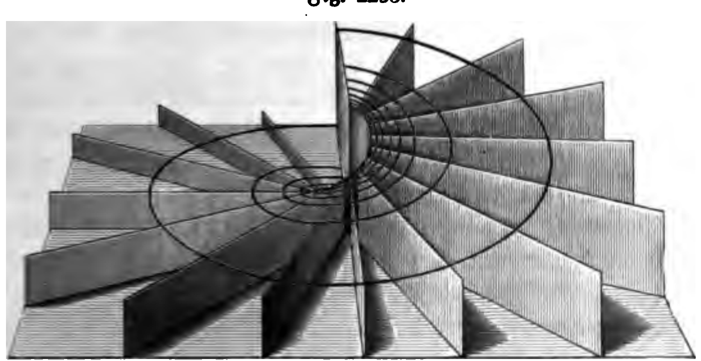
Systemen zusammengehöriger Kraftlinien ist auf den dem zweiten Bande beigegebenen Tafeln enthalten. Da dieselben mannigfache Verwendung finden, z. B. bei Diffusionserscheinungen, Wärmeleitung, Gravitation, elektrischer und magnetischer Anziehung, Stromleitung, Lichtstrom u. s. w., empfiehlt es sich, sie auch an dieser Stelle zu berücksichtigen [1]).

Fig. 2232.



In allen Fällen gilt der einfache Satz: **Die auf den herabgleitenden Körper wirkende Kraft** K ist der Größe nach gleich dem Potentialgefälle $\frac{dP}{ds}$ (Abnahme der potentiellen Energie der Gewichtseinheit pro Längeneinheit), der Richtung nach entgegengesetzt oder $K = -\frac{dP}{ds}$ Kilogramm, wenn dP den Unterschied der potentiellen Energien von 1 Kilogrammstück an zwei um ds Meter voneinander entfernten Stellen einer Kraftlinie bezeichnet. Die Behandlung dieses Satzes empfiehlt sich wegen der analogen Verhältnisse bei magnetischen und elektrischen Kraftfeldern [2]).

Fig. 2233.



62. Kraft und Maße. Die Konstruktion der Niveau- und Kraftlinien hat zur Voraussetzung, daß die Einheit, in welcher die potentielle Energie gemessen wird,

[1]) Bezüglich der Konstruktion siehe Holzmüller, Einführung in die Theorie der isogonalen Verwandtschaften, Leipzig 1882. — [2]) Statt potentielle Energie sind auch die Ausdrücke konfigurative Energie und Distanzenergie gebräuchlich. Die beiden Faktoren, deren Produkt die Energie ist, heißen Energiefaktoren, der eine (Gewicht) der Quantitätsfaktor, der andere (Höhe) der Intensitätsfaktor. Über die Lokalisierung der Energie sind indes mancherlei Bedenken möglich. Wird z. B. ein Schacht ausgegraben, so besitzt eigentlich die ausgehobene Erde die Energie. Es können aber auch irgend welche andere Körper in den Schacht hineinfallen, so daß schließlich die ausgehobene Erde ihre Energie verloren hat, da der Schacht ausgefüllt ist. Dieser Verlust ist eingetreten, ohne daß ihr die Energie in bemerkbarer Weise entzogen worden wäre, ohne daß ein Energiestrom stattgefunden hätte.

an jedem Orte dieselbe ist. Dies trifft nun aber für die von uns gewählte Einheit durchaus nicht zu. Hierin liegt ein großer Fehler des gewöhnlichen Maßsystems, welches deshalb zu wissenschaftlichen Zwecken nicht angewendet, sondern durch ein anderes, das sogenannte absolute, ersetzt wird.

Hätte man z. B. eine Federwage in Paris richtig geeicht, so daß sie dort bei Belastung mit einem Kilogrammstück 1 zeigen würde, so würde sie in Karlsruhe anzeigen 1,000 338, in Petersburg 1,001 287, in Madrid 0,999 457 kg u. s. w [1]).

Es ist somit der Wert des Kilogrammgewichts, d. h. der Kraft, mit welcher ein Kilogrammstück gegen die Erde hingezogen wird, von Ort zu Ort ein anderer. Eine in Paris geeichte Federwage wäre in Karlsruhe nicht zu gebrauchen. Man müßte unterscheiden zwischen Pariser Kilogramm, Karlsruher Kilogramm, Petersburger Kilogramm u. s. w., d. h. man hätte unendlich viele Krafteinheiten und entsprechend unendlich viele Arbeitseinheiten (Kilogrammmeter).

Alle Federwagen in Paris zu eichen ist bei der Veränderlichkeit derselben natürlich aussichtslos.

Man könnte nun daran denken, an Stelle der Schwere eines Gewichtstücks eine andere Kraft als Vergleichskraft zu benutzen, aber, wie wir uns auch umsehen mögen, es läßt sich keine finden, welche hinreichend konstant wäre, und noch weniger eine solche, die sich jederzeit mit vollkommener Genauigkeit reproduzieren läßt. Man könnte z. B. daran denken, die Spannung irgend einer Feder als Normalkraft zu wählen; allein diese würde sich abhängig erweisen von der Temperatur und vor allem von der Dauer der Deformation und im Falle des Verlustes wäre es ganz unmöglich, eine genau gleiche Feder herzustellen.

Man wird also ein ganz anderes Prinzip der Messung wählen müssen und zu einem solchen führt naturgemäß die Untersuchung der Wirkung einer Kraft.

Wir haben gesehen, daß schon im Altertum der Bau von großen Schleudermaschinen für Kriegszwecke eine der wichtigsten Aufgaben der Ingenieure war und wesentlich zur Förderung der physikalischen Kenntnisse und Klärung der Begriffe beigetragen hat. Die Entdeckung der treibenden Kraft der Schießpulvergase und ihre Verwertung zum Bau von Feuerwaffen aller Art gegen Ausgang des Mittelalters mußte notwendig zu weiterem Nachdenken über die Beziehung der Kräfte und der durch sie hervorgerufenen Bewegungen Anregung geben. Anderseits hatten tausendjährige Beobachtungen gelehrt, daß die Gestirne in stets gleicher Weise ihre Bahnen am Himmel ziehen, ohne daß von der Wirkung einer Kraft irgend etwas zu bemerken wäre.

Galilei (1638) war der erste, welcher durch Aufstellung seines Trägheitsgesetzes Klarheit in diese Verhältnisse brachte, nachdem man zuvor zunächst durch

[1]) Würde man beispielsweise das Gewicht eines Kilogrammstückes in 45° geographischer Breite und im Meeresniveau als Normalkilogramm bezeichnen, so wäre:

1 Karlsruher	Kilogramm	= 1,000 338	Normalkilogramm
1 Freiburger	„	1,000 218	„
1 Heidelberger	„	1,000 375	„
1 Berliner	„	1,000 664	„
1 Wiener	„	1,000 260	„
1 Florenzer	„	0,999 875	„
1 Petersburger	„	1,001 287	„
1 Pariser	„	1,000 333	„
1 Madrider	„	0,999 457	„

die großen Seefahrten jener Zeit die Entdeckung des Seeweges nach Indien und Amerika eine klare Vorstellung von der Gestalt der Erde und durch Aufstellung der kopernikanischen Theorie der Bewegung der Erde um ihre Achse und um die Sonne einen klaren Einblick in den Lauf der Himmelskörper gewonnen hatte.

Er war es auch, der zuerst durch Erfindung der nach ihm benannten Fallrinne ein Mittel gefunden hat, die durch eine bestimmte Kraft erzielte Geschwindigkeit zu messen.

63. Fallrinne und Fallmaschine. Ich benutze als Fallrinne ein 4 m langes aus T-Eisen hergestelltes gut justiertes Schienengeleise, das auf einem starken Brett befestigt ist. Auf diesem kann sich ein kleiner, mit schweren Bleigewichten belasteter Wagen mit exakt gearbeiteten leichten Rädern bewegen. Das Brett, auf welchem die Schienen befestigt sind, ist mit einer weithin sichtbaren Decimeterteilung versehen, und zwar nicht nur auf der Seite der Zuhörer, sondern auch auf der Seite des Experimentators.

Man gibt diesem Geleise eine bestimmte Neigung und setzt gegen das Ende einen Sandsack, welcher als Prellbock für den Wagen dient. Sodann setzt man den Wagen an einer Stelle auf, von welcher er gerade eine Sekunde bis zur Ankunft am Prellbock gebraucht, was durch den (elektrischen) Sekundenschläger in der Weise kontrolliert wird, daß man mit der Uhr 000... zählt und ihn beim Schlag einer Sekunde losläßt. Beim nächsten Schlag, d. h. bei eins, schlägt er an den Sandsack an. Der Versuch wird nun wiederholt [1]) für die Fallzeiten 2, 3, 4, 5... Sekunden und jeweils die zugehörige Fallstrecke abgelesen. Es ergibt sich, daß diese letzteren den Fallzeiten proportional sind, daß also die Gleichung gilt, $s = const \times t^2$.

Hieraus ergeben sich die Wege in den einzelnen Sekunden zu beziehungsweise $\frac{g}{2}, \frac{3g}{2}, \frac{5g}{2} \cdots$ und dementsprechend die mittleren Geschwindigkeiten in diesen Zeiträumen. Da nun die Geschwindigkeit zu Anfang der ersten Sekunde $= 0$ war, muß sie am Ende derselben g gewesen sein, da das Mittel von 0 und $g = \frac{g}{2}$. Ebenso am Ende der zweiten Sekunde g u. s. w. Am Ende der t^{ten} $v = g.t$.

Hiernach kann man die Beschleunigung für die angewandte Neigung der schiefen Ebene, d. h. für eine treibende Kraft, welche nach dem Gesetz von der schiefen Ebene gleich ist dem Gewicht des Körpers x, dem Verhältnis der Höhe zur Länge der schiefen Ebene, berechnen.

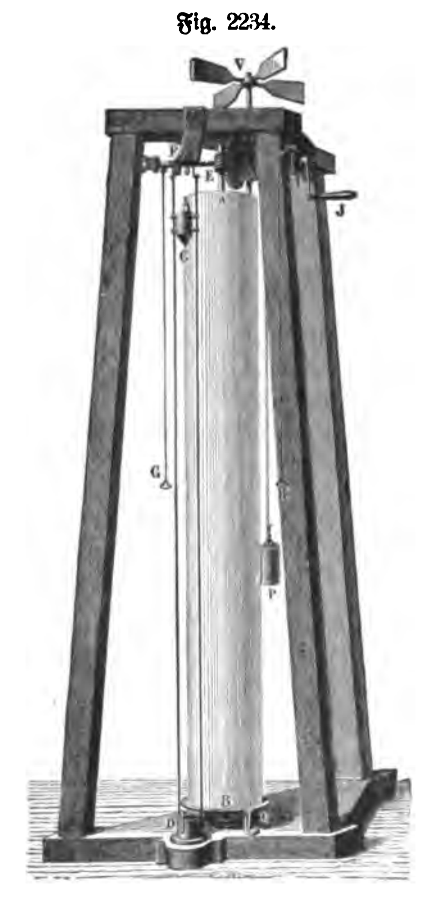
Wiederholt man die Versuche bei verschiedener Neigung der Ebene, also verschieden großer treibender Kraft, so ergibt sich, daß die Beschleunigung der Kraft proportional ist. Erhöht man nun aber die Kraft nicht durch Vergrößerung der Neigung der schiefen Ebene, sondern durch Vergrößerung der Belastung des Wagens, d. h. der Stoffmenge oder Masse desselben, so bleibt die Beschleunigung unverändert, sie ist somit nicht nur einfach proportional der Kraft,

[1]) Um den Satz $s = \frac{gt^2}{2}$ recht auffallend zu demonstrieren, läßt Mach vier Körper gleichzeitig längs einer schiefen Ebene herabfallen und befestigt darauf Anschläge derart, daß die Körper beziehungsweise nach Durchlaufen der Wege 1, 4, 9, 16 mit hörbarem Schlag aufgehalten werden. Die Schläge erfolgen dann in Pausen von einzelnen Sekunden. (Apparat zu beziehen von Universitätsmechaniker F. Hajeck, Prag. Preis 12 fl.)

sondern auch umgekehrt proportional der Masse. Man hat somit die Gleic $g = \frac{p}{m}$, falls man die Einheit der Masse so wählt, daß der Proportionalit faktor gleich eins wird.

Die Versuche ergeben ferner, daß, wenn die Höhe den zehnten Teil der Lä beträgt, somit die treibende Kraft der zehnte Teil des Gewichtes ist, eine Beschle gung von 0,98 m pro Sekunde erzielt wird. Für den zehnfachen Wert der treibe Kraft, d. h. wenn diese gleich dem Gewicht ist oder wenn der Körper frei he fällt, muß also $g = 9{,}81$ sein. Man hat somit den Satz $p = 9{,}81 \, . \, m$ $m = \frac{p}{9{,}81}$, d. h. die Masse eines Kör ist (in Karlsruhe) gleich seinem Gewicht divi durch 9,81 und die Masseneinheit ist Masse eines Körpers, welcher 9,81 kg wi

Fig. 2234.



Man hat auch verschiedene Vorrichtun konstruiert, um die Beschleunigung frei fal der Körper direkt zu messen, dahin ge Morins Fallmaschine. Ein schwerer, du bohrter Körper fällt längs eines vertikal spannten Drahtes und führt einen Zeichen längs eines mit Papier überzogenen vertik Cylinders von 2 m Höhe, auf welchem wenn der Cylinder ruhte, eine gerade Li verzeichnen würde. Nun wird aber der Cylin durch ein Uhrwerk in gleichmäßige Rotat gesetzt. Infolgedessen verzeichnet der S eine Kurve, die sich nach Abrollen und A breiten des Papiermantels als Parabel d stellt (Fig. 2234 Lb, 360).

Statt des Cylinders könnte man a eine rotierende Scheibe benutzen. Man kön den Körper an einem Faden, der zwisc den Klingen einer Schere hängt, aufhän und an der einen, beweglichen Klinge Schere einen mit Tinte gefüllten Pinsel festigen, welcher beim Zudrücken der Sch wobei der Faden zerschnitten wird, also Körper zum Fallen kommt, mit der rotierenden Scheibe in Berührung kommt auf dieser, so lange er dieselbe berührt, einen schwarzen Bogen verzeichnet. B Auffallen müßte nun der Körper auf einen Hebel auftreffen, welcher den Pi wieder von der Scheibe entfernt. Die Länge des verzeichneten Bogens in $1/_{100}$ st der Peripherie gäbe dann die Fallzeit in $1/_{100}$ stel Sekunden, wenn die Scheibe einer Sekunde eine Umdrehung macht.

Bahrdt (Z. 16, 325, 1903) bestimmt die Zeiten beim freien Fall, indem die gleichmäßige Bewegung des Gewichtsystems der Atwoodschen Fallmaschi (s. Kapitel 8) als Uhr benutzt. In dem Momente, in welchem das Übergewi beim Passieren des Ringes abgenommen wird, wird die Bewegung des fallend

Körpers selbsttätig ausgelöst und nun die Platte, welche das System auffängt, so lange verschoben, bis der Aufschlag genau im gleichen Momente erfolgt, in welchem der frei fallende Körper auf den Boden aufschlägt. Aus der Entfernung zwischen Platte und Ring und der Geschwindigkeit des Systems ergibt sich die Fallzeit.

Rousseau (1883) läßt einen axial durchbohrten, mit Papier überzogenen Holzcylinder längs eines Stabes herabgleiten. Derselbe streift einen feststehenden, mit Tinte gefüllten Pinsel, welcher bei der Abwärtsbewegung des Cylinders auf dem Papier einen geraden, der Achse parallelen Strich ziehen würde, wenn man den Cylinder nur infolge der Schwere sich bewegen ließe. Oben an den Cylinder sind nun aber zwei Vorsprünge befestigt, welche in Spiralführungen eingreifen, so daß der Cylinder in Drehung kommt, wie ein Geschoß infolge der Führung in den Zügen des Laufes. Infolgedessen beschreibt der Pinsel auf dem Cylinder keine gerade Linie, sondern eine Spirale, deren Gänge am unteren Ende dicht stehen, am oberen infolge der vergrößerten Fallgeschwindigkeit weit auseinander gezogen sind. Man kann die Geschwindigkeit der Rotation dadurch ändern, daß man bewirkt, daß die Vorsprünge die Führungen an einem höheren oder tieferen Punkte verlassen.

Ein sehr einfacher Apparat ist angegeben von Paquet (1883). Ein Körper in der Höhe 4 über dem Boden fällt frei herab, veranlaßt aber, nachdem er um die Höhe 1 gefallen, die Auslösung eines zweiten Körpers, welcher sich in der Höhe 1 über dem Boden befindet. Beide Körper schlagen zugleich auf, somit hat der erste Körper den Fallraum 3 in derselben Zeit durchlaufen, wie der zweite den Fallraum 1. Zum Befestigen des zweiten Körpers könnte man einen möglichst feinen Seidenfaden nehmen, der durch den ersten Körper (hierzu mit Schneide versehen) beim Auftreffen durchschnitten wird. Ebenso könnte man drei oder vier Körper von gleicher Größe nacheinander fallen lassen. Man kann auch auf gleiche Weise das Gesetz aufsuchen. Der erste Körper fällt, löst beim Vorbeikommen den zweiten aus, in einiger Entfernung schlägt dieser auf ein Hindernis auf und man sucht nun den ersten derart durch eine verstellbare Hemmung aufzufangen, daß die beiden Schläge zugleich erschallen. Mißt man nun die Fallräume, so findet sich der des ersten Körpers viermal so groß als der des zweiten.

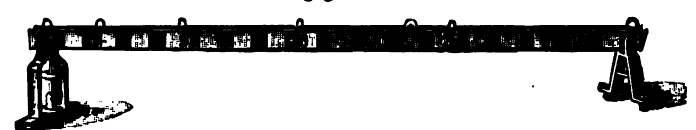
Läßt man ein in den Abständen 1, 4, 9... vom Boden mit Bleikugeln versehene, vertikal herabhängende Schnur fallen, so schlagen die Bleikugeln in gleichem Takte auf den Boden auf. Zur Gegenprobe nimmt man eine Schnur mit Bleikugeln in den Abständen 1, 2, 3...

Wenn nun oben gesagt wurde, die Beschleunigung sei umgekehrt proportional der Masse, so ist dies ohne weiteres einleuchtend nur dann, wenn sich die Stoffmenge nach dem Volumen beurteilen läßt, wie es z. B. in vielen Fällen im Handelsverkehr geschieht. Schon die Erfahrung des gewöhnlichen Lebens zeigt aber, daß das Volumen keineswegs ein zuverlässiges Maß der Stoffmenge ist. Ein Zentner Heu auf $^1/_{10}$ zusammengepreßt, besteht sicher noch aus der gleichen Menge Stoff und wiegt nach wie vor einen Zentner, das Volumen aber ist auf den zehnten Teil vermindert, so daß 1 cbm gepreßtes Heu zehnmal soviel wiegt als loses. 1 cbdm Blei wiegt ebenfalls etwa zehnmal soviel als 1 cbdm hartes Holz. Kann man hieraus schließen, daß ebenso in 1 cbdm Blei soviel Stoff enthalten ist in 1 cbdm Holz? Ohne weiteres ist dies nicht möglich, denn das größere Gewicht könnte daher rühren, daß die Erde auf die gleiche Menge Bleistoff eine zehnmal größere Kraft ausübt als auf Holzstoff. Die Fallrinne liefert die Entscheidung.

Man kann den Wagen mit den verschiedenartigsten Massen wie Blei, Eisen, Messing, Holz, Stein u. s. w. belasten, immer wird sich für g der Wert 9,81 ergeben. Das wäre nicht möglich, wenn bei gleicher Stoffmenge die Kraft eine verschiedene wäre, weil bei gleicher Stoffmenge die Beschleunigung der Kraft proportional ist. Es bleibt somit nur die Erklärung übrig, daß tatsächlich 1 cbdm Blei zehnmal soviel Stoff enthält als 1 cbdm Holz, und daß ganz allgemein die Masse eines Körpers dem Gewicht proportional ist, nämlich $m = \frac{p}{9,81}$. Hieraus folgt, daß als Masseneinheit zu bezeichnen ist die Masse eines Körpers, welcher 9,81 kg wiegt.

Fr. Emde, Elektrotechn. Zeitschr. 25, 441, 1904, schlägt vor die technische Masseneinheit „Hyl“ zu nennen. Er weist mit Recht darauf hin, daß seitens der Maschinentechniker inkonsequenterweise bald das Kilogramm (wie z. B. bei Bemessung der Verbrennungswärme), bald die technische Einheit zur Massenbestimmung verwendet und dadurch viel Anlaß zu Verwirrung gegeben wird.

Fig. 2235.



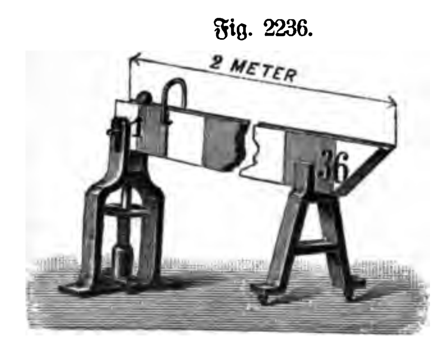


Fig. 2236.

Genau trifft die Bemerkung, daß alle Körper gleiche Beschleunigung g erlangen, nicht zu. Man kann sich davon leicht überzeugen, indem man eine kleine Bleiplatte und ein gleich großes Papierstück neben einander fallen läßt. Indes tritt die Verschiedenheit nicht auf, wenn man sie zusammenfallen läßt, auch dann, wenn das Papier auf dem Blei liegt, also nicht von diesem mitgenommen werden kann. Hieraus folgt, daß der Luftwiderstand, welcher im letzteren Falle nicht auf das Papier wirken kann, die Ursache der Differenz ist.

Die gebräuchlichen Formen der Fallrinne, wie solche in den Figuren 2235 (Lb, 25) und 2236 (E, 25) dargestellt sind, sind wesentlich einfacher als die beschriebenen und bestehen lediglich aus einem kräftigen Stab mit eingehobelter Rinne, in welcher man eine Elfenbeinkugel rollen läßt [1]).

W. König (Z. 7, 4, 1893) bildet die Fallrinne aus Messingröhren von 3 cm Abstand, die parallel nebeneinander herlaufen und läßt eine Kugel darauf rollen. Die ganze Länge beträgt 4,4 m. Um die Durchgänge der Kugel durch bestimmte Stellen weithin sichtbar zu markieren, werden neben der Fallrinne auf kleinen Klötzchen dünne senkrechte Metallstäbchen aufgestellt, die unmittelbar über der Fallrinne flache, sehr leicht drehbare Papierzeiger tragen. Diese werden zu Anfang des Versuches senkrecht zur Rinne eingestellt, die vorbeirollende Kugel schlägt sie zur Seite.

[1]) Die Vorschläge von Volkmann (Z. 7, 162, 1894) und Höfler (Z. 7, 276, 1894) decken sich mit denjenigen, welche bereits früher in der vorigen Auflage dieses Buches gemacht worden waren.

Mauritius (Z. 5, 271, 1895) verwendet eine schiefe Ebene aus gespannten Klaviersaiten, auf welchen Stahlkugeln, wie sie mit großer Vollkommenheit für Kugellager fabriziert werden, herabrollen.

64. **Absolutes Maßsystem.** Die festgesetzte Masseneinheit ist nicht minder unpraktisch wie die angenommene Krafteinheit, denn sie ändert sich mit dem Orte, wo man sich befindet. Während für Karlsruhe die Masseneinheit 9,81 kg wiegt, wäre für Madrid ein Gewicht von 9,80 und für Petersburg ein Gewicht von 9,82 als Masse 1 zu betrachten, ähnlich wie die Krafteinheiten für Karlsruhe, Madrid und Petersburg im Verhältnis der Zahlen 9,81 : 9,80 : 9,82 stehen, da sie ja den Beschleunigungen proportional sein müssen. Während das ursprüngliche Ziel der Festsetzung der neuen Gewichtseinheit das war, die vielen älteren Einheiten zu beseitigen, ist tatsächlich geradezu der entgegengesetzte Effekt erreicht worden, indem nun für jeden Punkt der Erde eine besondere Einheit festgesetzt wurde.

Man verdankt Gauß und Weber (1833) die Aufstellung eines besseren, sogenannten absoluten Maßsystems, welches diesen Fehler nicht besitzt, wenn es auch weit davon entfernt ist, ein wahrhaft absolutes Maßsystem zu sein, da es sich ebenfalls auf Archivmeter, Archivkilogramm und mittlere Sonnenzeitsekunde stützt. Bei der Ausbildung, in welcher dieses System gegenwärtig benutzt wird, dient als Einheit der Länge das Centimeter, als Einheit der Masse die eines Grammstückes und als Einheit der Zeit die Sekunde, es wird deshalb als das Centimeter-Gramm-Sekundensystem oder CGS-System bezeichnet. Einheit der Geschwindigkeit (Kin) ist eine Geschwindigkeit von 1 cm pro Sekunde, Einheit der Beschleunigung (Cel) eine Geschwindigkeitszunahme von 1 Kin pro Sekunde und Einheit der Kraft, welche der obigen Formel gemäß das Produkt von Masse mit Beschleunigung sein muß, die Kraft, welche der Masse 1 g, die Beschleunigung 1 Cel erteilt. Sie heißt 1 Dyne. Hierdurch bestimmt sich weiter die Einheit der Arbeit oder Energie als 1 Dyn × 1 cm = 1 Erg. Diese Maßeinheiten sind also für jeden Ort der Erde dieselben. Die Umrechnung von einem System in das andere läßt sich leicht bewerkstelligen. Da in Karlsruhe ein Grammstück durch sein Gewicht die Beschleunigung 981 cel erfährt, beträgt sein Gewicht 981 Dynen, in Madrid ist es 980, in Petersburg 982 Dynen. 1 kg wiegt in Karlsruhe 981 000, oder wenn man eine Million Dynen als Megadyne bezeichnet 0,981 Megadynen. Umgekehrt ist eine Megadyne = $10/g$ kg, wenn g die Beschleunigung 9,81 bedeutet [1]).

[1]) Die Ausdrucksweise, 1 kg wiegt 981000 Dynen, kann zu Mißverständnissen Anlaß geben, indem seit Jahrtausenden die Wage und Gewichtssteine zur Vergleichung von Stoffmengen benutzt wurden und demzufolge jedermann den Ausdruck, ein Körper wiegt so und soviel oder das Gewicht betrage so und soviel, auf die Stoffmenge desselben bezieht. Mit Recht heißt es in Thomson und Tait, Handbuch der theoretischen Physik, Braunschweig 1871, Bd. I, S. 185, § 221, ausdrücklich: „In der Tat sind Gewichte Massen, nicht Kräfte." Leider ist neuerdings von der Generalversammlung der Vertreter des internationalen Maß- und Gewichtswesens zu Sèvres bei Paris eine Erklärung angenommen worden, nach welcher künftig unter Gewicht das Produkt von Masse und Beschleunigung zu verstehen sein soll und als Normalgewicht das Produkt der Masse und 980,6665. Auch von anderer Seite (vergl. Z. 16, 163, 1903) ist diesem Vorschlag Beifall gespendet worden. Mir scheint es indes ganz ausgeschlossen, daß man durch solche Bestimmungen einen uralten Sprachgebrauch ändern kann, das Ergebnis wird nur eine vergrößerte Verwirrung sein. Die Bestimmung erscheint auch ganz überflüssig, da die Sprache zur Bezeichnung der Kraft das bereits eingebürgerte und allgemein verständliche Wort

65. Dimensionen. Die Umrechnung von einem Maßsystem in ein ander vollzieht sich sehr einfach, hätte z. B. ein Körper die Geschwindigkeit $v = 2\frac{1}{s}$ und soll dieselbe in CGS-Einheiten umgerechnet werden, so wäre zu berücksichtige daß $1\,m = 100\,cm$, also $v = 2\cdot\frac{100\,cm}{sec} = 200\,\frac{cm}{sec}$.

Ebenso wird die Beschleunigung $9{,}81\,\frac{m}{sec^2} = 9{,}81\,\frac{100\,cm}{sec^2} = 9{,}81\,\frac{cm}{sec^2}$ u die Kraft $5\,kg = 5\,\frac{\text{Masseneinheit} \times m}{sec^2} = 5\,\frac{9810\,g\,.\,100\,cm}{sec^2} = 5\,.\,9810\,.\,100\,\frac{g\,.\,c}{sec}$ $= 4905000\,\frac{g\,.\,cm}{sec^2}$, und die Energie $127000\,kgm = 127000\,\frac{\text{Masseneinheit} \times m \times}{sec^2}$ $= 127000\,\frac{9810\,g\,.\,100\,cm\,.\,100\,cm}{sec^2} = 124587\,.\,10^8\,\frac{g\,.\,cm^2}{sec^2}$ u. s. w.

Es ergibt sich für die Umrechnung die einfache Regel: Man ersetze in der B nennung der Größe die vorhandenen Einheiten durch die neuen und ziehe die au tretenden Zahlen zu der Zahl vor der Benennung. Hierzu ist es nicht nötig, d Benennung vollständig hinzuzuschreiben. Es genügt z. B. bei der Umrechnung vo Kilogrammmetern in Erg zu wissen, daß die Dimension der Größe $\frac{m\,.\,l^2}{t^2}$, d. Masse × Länge² : Zeit², um sofort angeben zu können, daß der zur Zahl z zuzufügende Faktor beträgt $9810\,.\,100^2$, daß also $127000\,kgm = 127000\,.\,981$ $.\,100^2$ CGS.

Die Kenntnis der Dimensionsformeln ermöglicht in manchen Fällen eine ein fache Kontrolle von Rechnungen. Eine richtige Gleichung kann nämlich nicht dadurc unrichtig werden, daß man zu einem anderen Maßsystem übergeht, d. h. die Dimen sionen der auf beiden Seiten stehenden Ausdrücke müssen notwendig gleich sein. I dies nicht der Fall, so kann man sicher sein, daß die Gleichung falsch ist.

„Schwere", Schwerkraft, besitzt. Nicht unzweckmäßig ist der Vorschlag, die Bezeichnun kg zu gebrauchen, wenn Masse, die Bezeichnung Kilogramm, wenn Kraft gemeint is Zu lang und unklar sind die Bezeichnungen Kilogrammmasse und Kilogrammgewich Fritz Emde (Zeitschr. f. Elektrotechnik, Wien 1903, Heft 23) empfiehlt das folgende vo Giorgi (1902) aufgestellte Maßsystem: Länge: Meter, Masse: Kilogramm, Zeit: Sekunde Kraft: $^1/g$ Kilogramm (Decimegadyne, 10^5 Dynen), Leistung: Watt, Spannung: Vol Stromstärke: Ampere, Widerstand: Ohm, Induktionskoeffizient: Henry, Kapazität: Fara Magnetomotorische Kraft: 1 A. W. (Amperewindung), Magnetische Permeabilität de Vakuums $\frac{4\pi}{10^7}$, Magnetischer Induktionsfluß 10^8 Kraftlinien (= 1 Kraftröhre = 1 Weber) Olof Linders (Die für Technik und Praxis wichtigsten physikalischen Größen, Leipzig Jäh u. Schunke, 1904) empfiehlt das D. K. S.-System, dessen Einheiten sind: Länge Decimeter, Masse: Kilogramm, Zeit: Sekunde, Spannung: Volt, Stromstärke: Ampere Widerstand: Ohm, Leistung: Watt, Selbstinduktionskoeffizient: Henry, Elektrizitäts menge: Coulomb, Kapazität: Farad. Neesen (Ber. d. d. phys. Ges. 1903, 254) häl es ebenfalls für unmöglich das Wort „Gewicht" als Kraft zu deuten, da nun einmal durch Wägen mit der Wage mit Gewichtstücken stets nur Massen, nicht Kräfte be stimmt werden.

Zweites Kapitel.

Feste Körper.

66. Teilbarkeit. Wenn ich einen Menschen fortzuziehen suche, welcher Widerstand leistet, und es herrscht Gleichgewicht, so fühle ich, daß ich eine Kraft ausübe und weiß, daß sie nicht zur Wirkung kommt, weil sie durch die entgegenwirkende Kraft des anderen Menschen gehindert wird. Ebenso könnte meiner Kraft die Kraft eines Tieres, einer Maschine oder einer gespannten Feder und dergl. Widerstand leisten. Und so wie meine Kraft durch meinen Willen, meine Person hervorgebracht wird, so denke ich mir die Kraft des Widerstandes, als etwas meiner eigenen Kraft Gleichartiges, ausgeübt von einem Agens, einem Wesen wie ich, d. h. von einem Individuum [1]).

Betrachten wir nun die Anziehung eines Steines durch die Erde, so ist klar, daß die Erde nicht als ein Individium aufgefaßt werden kann. Sie setzt sich aus sehr verschiedenartigen Teilen zusammen, wie z. B. gewöhnlicher Erde, Gestein, Wasser u. s. w. und jede Erdart, jedes Gestein ist, wie die Beobachtung unter dem Mikroskop lehrt, wieder ein Aggregat kleiner Partikelchen; man denke z. B. an Sandstein, Granit u. s. w., (Demonstration von Dünnschliffen von Gesteinen). Aber auch das kleinste wahrnehmbare Partikelchen ist nicht ein unteilbares Ding, ein Individuum, wir können es wenigstens in Gedanken noch weiter zerteilen, anscheinend bis ins Unendliche. Soweit dürfen wir nun aber nicht gehen, wenn die Erscheinungen noch begreiflich bleiben sollen, denn eine unendlich große Menge unendlich kleiner Teilchen entzieht sich unserer Anschauung. Wir müssen annehmen, daß die Materie nur beschränkte Teilbarkeit besitzt, daß sie aus Atomen, d. h. weiter nicht mehr teilbaren kleinsten Partikelchen besteht.

Die Anziehung eines Steines durch die Erde ist die Summe aller Kraftwirkungen ihrer Atome. Jedes Atom muß also eine Kraftwirkung auf jedes andere ausüben, denn auch der Stein ist nur ein Aggregat von Atomen, es werden sich also auch zwei beliebige Steine gegenseitig anziehen müssen. Dies trifft in der Tat, wie die Versuche gelehrt haben, zu.

Man könnte z. B. auf eine Seite einer empfindlichen Wage statt der Wagschale an einem dünnen Draht ein Kilogrammstück anhängen und die Wage durch eine auf die andere Schale gelegte Tara ins Gleichgewicht bringen. Würde man nun in 1 m Abstand unter dieses Kilogrammstück ein anderes bringen, so würde sich die Gravitationskraft geltend machen und man müßte zu der Tara auf der Wagschale ein Zusatzgewicht zufügen, um das Gleichgewicht wieder herzustellen, welches 6,6 Milliontel Milligramm beträgt. Ersetzt man eins der Kilogrammstücke durch 2, 3, 4 ... kg, so wird das erforderliche Zusatzgewicht 2, 3, 4 ... mal größer. Die Gravitationskraft ist somit direkt proportional den Massen. Änderung des Abstandes auf $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ ... m würde die Anziehungskraft auf die 4, 9, 16 ... fache Größe bringen, d. h. sie ist umgekehrt proportional der

[1]) Schon Protagoras sagt: „Der Mensch ist das Maß aller Dinge.“

Entfernung. Allgemein beeinflußt also eine Masse von p_1 kg eine solche von p_2 kg im Abstand r Meter mit der Kraft

$$K = 0,65 . 10^{-10} . \frac{1}{g} . \frac{p_1 . p_2}{r^2} \text{ Kilogramm.}$$

Mißt man die Massen in der oben besprochenen technischen Einheit und seien ihre Werte m_1 und m_2, somit ihre Gewichte $g . m_1$ und $g . m_2$, so ist die Kraft

$$K = 0,65 . 10^{-10} \cdot g \cdot \frac{m_1 . m_2}{r^2} \text{ Kilogramm.}$$

Benutzt man das CGS-System, d. h. mißt man die Massen in Gramm und die Kraft in Dynen, so lautet das Gravitationsgesetz:

$$K = 6,68 \cdot 10^{-8} . \frac{m_1 . m_2}{r^2} \text{ Dynen,}$$

d. h. zwei Grammstücke beeinflussen sich im Abstand 1 cm mit der Kraft 6,68 $. 10^{-8}$ Dynen.

Natürlich sind die gewöhnlichen Federwagen oder Hebelwagen für solche Versuche nicht genügend empfindlich; mit Hilfe der Bifilar- und Kontrafilarwage sowie mittels der Torsionswage ist aber die Messung möglich, ja man hat sogar Demonstrationsapparate für diesen Zweck konstruiert, welche indes die Anwendung von Spiegelablesung erfordern (Edelmann, München), die erst später besprochen werden kann.

Fig. 2237 zeigt eine solche Gravitationswage. Auf einem Dreifuß mit Stellschrauben erhebt sich ein drehbares Säulchen, welches das Gehäuse für den kleinen Wagebalken trägt. Auf dem Gehäuse sitzt ein kurzes weites und ein langes enges Rohr. Das enge Rohr trägt am oberen Ende die Aufhängevorrichtung für den Quarzfaden, an welchem der Wagebalken aufgehängt ist. Das weite Rohr trägt zwei im rechten Winkel zueinander stehende Glasfenster für den Ein- und Austritt eines Lichtstrahls. Der kleine Wagebalken besteht aus einem dünnen harten Kupferdraht, welcher an beiden Enden kleine Kugeln aus reinem Silber trägt. Der Wagebalken ist in der Mitte befestigt an einem leichten Aluminiumstäbchen, welches in der Höhe der Fenster einen kleinen Spiegel trägt. Das Aluminiumstäbchen ist mit seinem oberen Ende angekittet an den Aufhängefaden aus Quarz. Das Wagebalkengehäuse ist allseitig mit doppelten Glaswänden versehen, um den Einblick zu gestatten und um Luftströmungen und schnelle Temperaturveränderungen unschädlich zu machen.

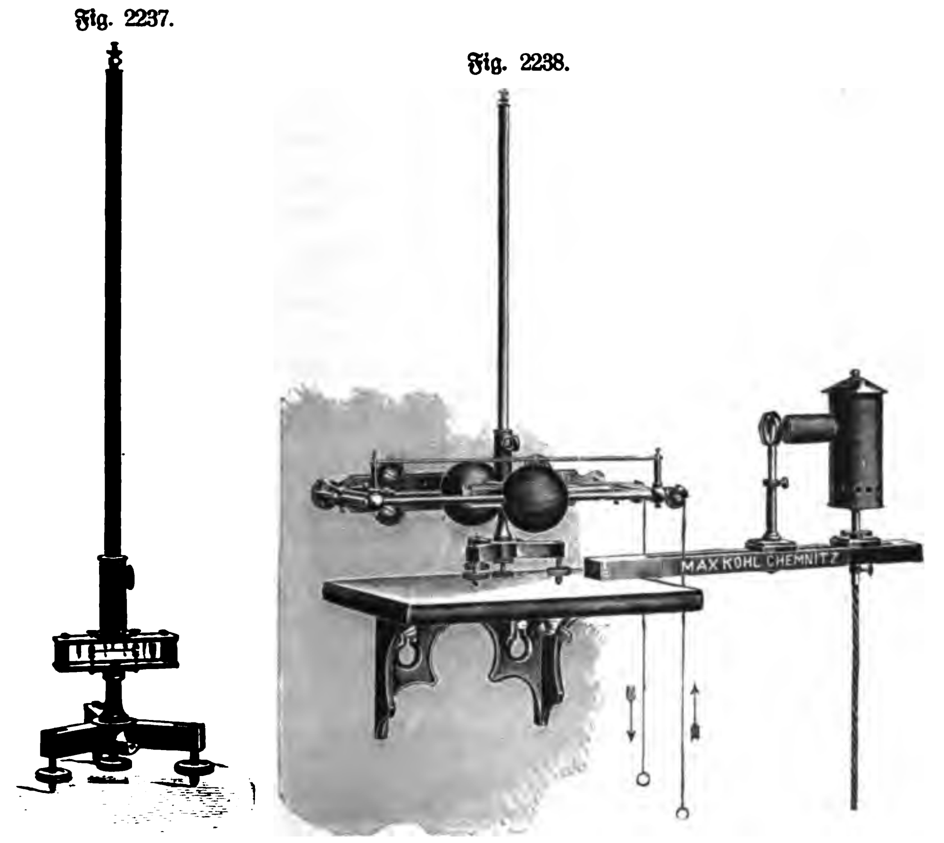
Zur Arretierung des Wagebalkens sind in einem kleinen Abstande über den frei schwingenden kleinen Kugeln halbkugelförmige Schalen angebracht. Zwei solche Schalen sind auch unter den kleinen Kugeln angebracht und durch eine in der Höhe verschiebbare Schiene miteinander verbunden. Die Verschiebung der Schiene erfolgt durch eine Schraube, welche das Säulchen nach unten durchsetzt und unterhalb des Dreifußes einen gerändelten Kopf trägt. Durch Drehen an diesem Kopfe wird die Schiene mit den unteren Lagerschalen gehoben, dieselben umfassen die kleinen Kugeln und drücken dieselben bei weiterem Heben gegen die oberen Lagerschalen. Dadurch wird der Quarzfaden vollständig entlastet und gegen Zerreißen gesichert. Der Apparat ist in arretiertem Zustande transportabel und ohne Gefahr für den Quarzfaden versandfähig.

Fig. 2238 zeigt die Gravitationswage in ihrer Aufstellung auf einem Wandkonsol zusammen mit den ablenkenden Massen und mit der Glühlampe zur Erzeugung des Lichtzeigers. Die ablenkenden Massen werden von zwei Bleikugeln von 80 mm

Durchmesser gebildet, welche in einem Rahmen auf zwei Führungsstangen mittels Rollen und Schnüren symmetrisch zu dem Wagebalken verschoben werden können, so daß in den äußersten Stellungen die größte ablenkende Kraft in der einen oder andern Richtung auf den Wagebalken ausgeübt wird, während in der Mittelstellung das Drehmoment der Anziehung jeder Bleikugel auf beide Silberkugeln gleich, aber entgegengesetzt ist. Das resultierende Drehmoment ist in dieser Stellung gleich Null. Der Rahmen mit den Führungsstangen wird unabhängig von dem Konsol des Apparates an der Wand befestigt. An dem Konsol des Apparates ist rechts ein beweglicher Arm angebracht, welcher eine Glühlampe mit einem geraden Faden und

Fig. 2237.

Fig. 2238.



eine Konvexlinse trägt. Das Bild des Fadens der Glühlampe wird mit Hilfe der Linse auf den Spiegel des Apparates geworfen und von diesem auf eine Skala reflektiert, die von einer gegenüberliegenden Wand in passender Höhe aufgehängt ist[1]).

Nach der ersten Formel ist z. B. die Kraft zwischen einem Gewichtstein von 50 kg und einem solchen von 5 kg in 0,5 m Abstand:

$$K = 0{,}65 \,.\, 10^{-10} \,.\, \frac{1}{g} \cdot \frac{50 \,.\, 5}{0{,}5^2} = 6{,}6 \,.\, 10^{-9} \text{ Kilogramm}$$

= 6,6 Tausendstel Milligramm[2]).

[1]) Zu beziehen von Max Kohl in Chemnitz zu 300 Mk. — [2]) Nach Richarz u. Krigar-Menzel, Sitzungsb. d. Berl. Akad. 48, 1305, 1896 ist der genauere Wert der Gravitationskonstante $f = (6{,}685 \pm 0{,}011) \,.\, 10^{-8} \, \frac{cm^3}{g\,sec^2}$.

Mit einer äußerst empfindlichen gewöhnlichen Wage würde es vielleicht noch möglich sein, diese Kraft nachzuweisen, indes steht nichts entgegen, das feste Gewicht noch wesentlich größer und den Abstand kleiner zu nehmen, wodurch sich die Kraft entsprechend vergrößert. Die Torsionswage hat den Nachteil, daß es hier zunächst nicht möglich ist sie zu eichen — dies kann erst nach Besprechung der Schwingungsbewegung geschehen — so daß die Gravitationskraft nur qualitativ nachgewiesen werden kann. Ein Horizontalpendel könnte dagegen auf dem Wege der Rechnung geeicht werden.

Mittels eines feinen Horizontalpendels läßt sich auch die von seiten des Mondes auf die daran befestigte Masse ausgeübte Kraft bestimmen, welche während der (scheinbaren) Bewegung des Mondes natürlich stets nach diesem hin gerichtet ist (Zöllner).

Ist die Gravitationskonstante bestimmt, so kann das Gravitationsgesetz dazu dienen, das Gewicht der Erde zu bestimmen. Beträgt dasselbe x kg, so ist nach der letzten Formel das Gewicht eines Grammstückes $= 6{,}68 \,.\, 10^{-8} \cdot \frac{x \,.\, 1000}{R^2}$, wenn $R = \frac{40 \,.\, 10^8}{2\pi}$ den Erdradius in Centimeter bedeutet. Dieses Gewicht beträgt aber 981 Dynen, somit ist $981 = 6{,}68 \,.\, 10^{-8} \frac{x \,.\, 1000 \,.\, 4\pi^2}{16 \,.\, 10^{18}} \cdot$ Hieraus folgt $x = 5{,}88 \,.\, 10^{24}$ kg $= 58{,}8 \,.\, 10^{20}$ Tonnen (rund 6000 Trillionen Tonnen).

Man findet ferner durch den Versuch das Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung bestätigt.

Würde man das eine Gewichtstück an eine Federwage hängen und das zweite auf einer Federwage liegend darunter bringen, so würde sich zeigen, daß die erste Federwage um diesen Betrag stärker ausgezogen, die andere um den gleichen Betrag erleichtert erscheint, wie wenn man zwischen den beiden Gewichtstücken eine Spiralfeder anbrächte, welche sie mit der genannten Kraft gegeneinander zieht.

Es zieht somit nicht nur die Erde den Stein, sondern auch der Stein die Erde gegen sich und zwar mit gleicher Kraft. Wegen der unverhältnismäßig größeren Masse der Erde ist die Beschleunigung natürlich entsprechend geringer. Ein Kilogrammstück z. B. würde der Erde eine Beschleunigung von $9{,}81 \cdot \frac{1}{5{,}88 \,.\, 10^{24}} = 1{,}68 \,.\, 10^{-24}$ Meter pro Sekunde erteilen. Richtiger sagt man zwischen Erde und Stein wirkt eine Kraft (vergl. S. 667).

Anscheinend wirkt die Schwere auf alle Stoffe in gleicher Weise, die Verschiedenheiten des Gewichts sind nur durch die Verschiedenheiten der Dichte bedingt, doch gibt es auch eine Ausnahme, den Äther (oder die Elektrizität nach der Elektronentheorie), welcher als Imponderabile betrachtet werden muß.

Man hat das Gravitationsgesetz auch benutzt, um zu einer wirklich absoluten Zeiteinheit zu gelangen [1]). Hiernach wäre als absolute Zeiteinheit zu wählen die Zeitdauer, die die Masseneinheit (1 ccm Wasser) gebrauchen würde, um einer zweiten in der Entfernung 1 cm die Beschleunigung 1 cm/sec² zu erteilen. Sie ist = 3862 Sekunden = 1 Stunde, 4 Minuten, 22 Sekunden.

---

[1]) Über Vorschläge, aus dem Gravitationsgesetz ein absolutes Maß der Zeit abzuleiten, siehe Lippmann, Z. 13, 99, 1900.

67. Undurchdringlichkeit. Zwischen je zwei Atomen wirkt eine Kraft. Eine Kraft kann aber für sich nicht im Gleichgewicht sein. Die Atome müßten also schließlich zusammen kommen und sich infolge der Trägheit durchdringen, wenn nicht eine neue Kraft auftreten würde, welche dies hindert. Alle Stoffe zeigen die allgemeine Eigenschaft, daß sie einen Raum einnehmen und in dem Sinne undurchdringlich sind, wie z. B. eine größere Menschenmasse für eine andere undurchdringlich ist. Hier können wohl die einzelnen Individuen nebeneinander vorbeikommen, nicht aber kann ein Individuum den Raum einnehmen, den ein anderes bereits inne hat. Wir gelangen so zu der Vorstellung, daß auch jedes Atom einen Raum einnimmt (Atomvolumen), ähnlich wie jeder Mensch einen Raum erfüllt. Kein Atom kann den Raum einnehmen, den ein anderes bereits inne hat. Wohl kann ein Körper z. B. in weichen Lehm eindringen, dabei findet aber lediglich ein Ausweichen der Teilchen statt, ähnlich, wie wenn ein Mensch sich in eine größere Ansammlung von Menschen eindrängt.

Wir müssen also annehmen, daß die Atome Kräfte auszuüben imstande sind, welche das Eindringen, ja schon die Annäherung anderer Atome verhindern. Andererseits müssen wir, um den Zusammenhang der Körper erklären zu können, den Atomen auch anziehende Kräfte zuschreiben, welche von der Gravitationskraft verschieden sind, da letztere, wie man sich leicht durch eine Rechnung überzeugen kann, zu klein ist um zu erklären, daß beim Ziehen an einem Körper die Teilchen sich nicht voneinander trennen, falls nicht die Kraft einen sehr hohen Wert annimmt[1]).

[1]) Die Atome sind gewissermaßen die Nachfolger der alten Naturgottheiten oder Dämonen. Die Entstehung der Atomhypothese (Demokritos 470 bis 362, Anaxagoras 500 bis 423) fällt in die Zeit der Trennung der Naturwissenschaft von der alten Götterlehre. Der Unterschied der Atome von den Dämonen besteht vor allem darin, daß sie nicht mit freiem Willen begabt sind, also nicht willkürlich schalten und walten können, sondern strengen, unabänderlichen und unübertretbaren Gesetzen, den Naturgesetzen, sich fügen müssen, deren Existenz die fortgesetzte Naturbeobachtung erwiesen hatte. Man kann fragen, ist die Existenz der Atome nicht eine ebenso problematische wie die der Dämonen und müssen wir deshalb der modernen Physik nicht das größte Mißtrauen entgegenbringen? Man hat auch die Vorstellung, die uns zur Bildung des Atombegriffs geführt hat, daß das Wesen, welches eine Kraft ausübt, ein Individuum sein muß, wie ein Organismus, der eine Kraft ausübt, als verfehlt erklärt. Insofern ein Organismus ja überhaupt kein Individuum ist, wie durch die große Reproduktionsfähigkeit mancher Organismen, z. B. Pappeln, Weiden, Würmer u. s. w., bei denen jedes abgeschnittene Stück wieder zu einem vollkommenen Individuum auszuheilen vermag, bewiesen wird, erscheint der Einwand nicht unberechtigt; er verliert aber seine Bedeutung, sobald wir unser Bewußtsein mit in Betracht ziehen, welches absolut unteilbar ist. Wir erkennen somit, daß die Bildung des Atombegriffs aufs innigste verbunden ist mit psychischen Vorgängen, daß es nur Bilder sind, Gleichnisse, die wir uns machen, denen wahrscheinlich die Wirklichkeit durchaus nicht entspricht, so daß sich empfiehlt, diese Vorstellungen nur insoweit anzuwenden, als die Beschreibung der Erscheinungen unbedingt erfordert und stets deren hypothetischen Charakter wohl zu berücksichtigen. Immerhin liegt in der Benutzung des Atombegriffs an sich nichts hypothetisches, es kann somit dadurch keine Unsicherheit in die Wissenschaft eingeführt werden, denn die Physik behauptet nicht die Existenz von Atomen, sie beschreibt lediglich die Tatsachen in der Form, daß sie erklärt, die Erscheinungen vollziehen sich so „als ob“ Atome existierten. Es läßt sich auch diese Art und Weise der Beschreibung nicht umgehen, denn in manchen Fällen wäre zur Beschreibung der Erscheinungen (z. B. der Identität der Lösung von Mischkristallen mit der Mischung der Lösungen ihrer Komponenten) die Einführung unendlich vieler neuer Bezeichnungen erforderlich, was praktisch undurchführbar ist.

68. **Kraftzentren, Kraftfäden.** Eine wesentliche Schwierigkeit, die sich Atomhypothese entgegenstellt, ist die *unvermittelte Fernwirkung* der Ato worauf schon früher (S. 667) hingewiesen wurde. Zwei aufeinander einwirke Atome stellen die beiden Angriffspunkte einer wahren Kraft dar, welcher wahrschei Trägheitskräfte, die nur einen einzigen Angriffspunkt haben, d. h. nur auf je Atom wirken, entgegenstehen. Die Atome sind die Enden von *Kraftfäden*, gleichbar *gespannten Muskeln*, und wenn wir sagen, ein Atom übt eine K aus, so ist dies in gleichem Sinne zu verstehen, wie wenn wir sagen würden, Endpunkt eines Muskels übt eine Kraft aus. Tatsächlich ist es nicht dieser E punkt, sondern der Muskel selbst und da die Gravitationskraft auch im le Weltraum auftritt, so müßten wir zugeben, daß auch ein im leeren Raum dachter Kraftfaden, d. h. etwas, was in Wirklichkeit nicht existiert, eine Kraft a üben kann. *Faraday* beseitigte die Schwierigkeit, indem er annahm, der l Raum sei von *Äther* erfüllt, einem Aggregat wirklich existierender Kraftfäden.

Nicht die Atome sind die eigentlichen Kraftträger, sondern die Kraftfäden, sich zwischen den Atomen spannen. *Masse* ist in Wirklichkeit nur eine Anhäuf von Kraftfädenendigungen, die für sich keinen Raum einnehmen. Die *Undurdringlichkeit* der Masse wird nur durch das Auftreten molekularer Kraftfä und von Trägheitskräften bedingt.

Damit entsteht aber die weitere Schwierigkeit, daß wir entweder die mann fach auftretenden Kräfte wie Gravitation, Molekularkräfte, elektrische und magneti Anziehung alle als Wirkungen derselben Kraftfäden deuten müssen, was untun ist, oder daß man eine Vielheit von Kraftfäden annehmen muß, die sich geg seitig durchdringen können, was ebenso untunlich ist, da kein Kraftfaden z schnitten werden kann (sowenig wie ein gespannter Muskel), ohne daß seine W kung aufhört.

Denkt man sich die Gravitationsmuskulatur des Äthers bestehend aus Ket hintereinander geschalteter Kraftfäden, so erscheinen die Berührungspunkte der letzte als *Atome des Äthers*. Sie sind natürlich ebenso wie die des Stoffes *unteilba* erfüllen aber keinen Raum, weil sie nur mathematische Punkte oder Flächen si

Wollen wir also die Gravitationserscheinungen auf die Wirkung von Kräft welche nach Art unserer Muskelkraft wirken, und die allein für uns begreifl sind, zurückführen, so müssen wir zugeben, daß es *keine unvermittelte Fernwirkung* der Atome im Sinne *Newtons* gibt, sondern nur Wirkungen d Zwischenmediums, des Äthers.

Hält man sich für berechtigt, dem Worte Kraft einen anderen Sinn unt zuschieben an Stelle desjenigen, den es seit alten Zeiten besitzt, d. h. gibt man d Existenz von Kräften zu, deren Angriffspunkte nicht durch ein existierendes Mediu verbunden sind, die nur wie Trägheitskräfte einen einzigen Angriffspunkt habe von diesem gewissermaßen in die Unendlichkeit ausstrahlen (*direkte Fernwirkun* so kann man von der Existenz einer Newton'schen Kraft sprechen und mag au die Atome sich als Körper denken, welche wie Menschen einen Raum einnehme

Die Enden von Kraftfäden sind mathematische Flächen ohne Dicke. Na der Kraftlinientheorie müßte man sich also die Atome denken als absolut lee Räume im Äther, welche von Kraftfädenendigungen umschlossen sind, d. h. ma müßte annehmen, daß gerade das, was wir Stoff oder *Masse* nennen, was w gewöhnlich als das eigentlich Reale betrachten, in Wirklichkeit überhaupt nicht existie

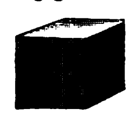
Am schwierigsten gestaltet sich die Erklärung des Gesetzes der Erhaltung des Stoffs oder der Konstanz der Masse, welches natürlich Konstanz der Kraftfäden voraussetzt. Bei einem System zahlreicher gravitierender, sich umeinander drehender Massen müßte dabei notwendig eine Verschlingung der Kraftfäden eintreten, falls diese sich nicht gegenseitig durchbringen können. Dabei wird aber wieder die Undurchdringlichkeit des Stoffs unverständlich u. s. w.

Wenn nun auch wohl schon der Gedanke ausgesprochen wurde, daß der Stoff tatsächlich nicht existiere, sondern nur als eine Anhäufung von Energieformen zu betrachten sei[1]), so stellen sich doch auch dieser Auffassung unüberwindliche Schwierigkeiten entgegen.

Die Möglichkeit einer Erklärung der Gravitationserscheinungen in einer für uns begreiflichen Weise, d. h. durch Kräfte nach Art unserer Muskelkraft, kann somit bis jetzt nicht zugegeben werden. Versuche, dieselben auf Trägheitskräfte (in Verbindung mit Molekularkräften) zurückzuführen (Le Sage), sind ebenfalls ohne Erfolg geblieben.

69. **Porosität und Dichte** (Dichtigkeit). Die eigentümliche Tatsache, daß die Volumeneinheit verschiedener Substanzen verschiedenes Gewicht hat und dennoch die Beschleunigung, welche durch die Schwerkraft hervorgebracht wird, stets den gleichen Wert hat, haben wir uns dadurch erklärt, daß die Teilchen, welche von der Erde angezogen werden, in schwereren Körpern in größerer Dichtigkeit, d. h. in kleineren Abständen, vorhanden sind. Diese Teilchen sind indes nicht die Atome. 1 cdm Blei (Fig. 2239, Lb.) ist schwerer als 1 cdm Holz. Zerteilen wir beide und setzen wir die Zerteilung fort bis zu den Atomen, so sind die Bleiteile immer noch Blei, die Holzteile Holz, es wird also die Verschiedenheit der Dichte auch noch bei den Atomen bestehen und man kann sich vorstellen, daß auch diese wieder porös, d. h. aus noch kleineren Teilen aufgebaut sind[2]). Wie groß der Unterschied der Dichten von Blei und Holz ist, wird besonders deutlich, wenn man 1 cdm Blei und einen Balken von 1 qdm Querschnitt, welcher das gleiche Gewicht (etwa 11 kg) besitzt, zugleich auf eine Tafelwage bringt und darauf hinweist, daß letztere trotz der großen Verschiedenheit des Volumens der beiden Körper einspielt.

Fig. 2239.



Im technischen Maßsystem ist naturgemäß die Einheit der Dichte die Anzahl technischer Masseneinheiten (Hyl), welche in 1 cbm enthalten sind; im absoluten die Masse eines Cubikcentimeters in Gramm. Beispielsweise findet sich die Dichte d eines rechtwinklig bearbeiteten Klotzes aus Buchenholz von den Seitenlängen 2,8, 1,0 und 1,6 dm und dem Gewicht 2,87 kg:

$$\text{Technisch: } d = \frac{2{,}87 \,.\, 1000}{9{,}81 \,.\, 2{,}8 \,.\, 1 \,.\, 1{,}6} = 65 \frac{\text{Hyl}}{\text{cbm}}$$

$$\text{Absolut: } d = \frac{2870}{2{,}8 \,.\, 1 \,.\, 1{,}6 \,.\, 1000} = 0{,}64 \frac{\text{g}}{\text{ccm}}.$$

Für einen cylindrischen Bleikörper von 1,2 dm Höhe und 0,87 dm Durchmesser, welcher 7,9 kg wog, findet sich:

[1]) Siehe W. Ostwald, Zeitschr. f. phys. Chem. 18, 316, 1895, und Vorlesungen über Naturphilosophie, Leipzig 1902, Veit u. Comp. — [2]) Crookes, Lenard u. a. machen tatsächlich zur Erklärung der Kathodenstrahlen, Radiumstrahlen u. s. w. diese Annahme.

$$\text{Technisch: } d = \frac{7{,}9\,.\,1000\,.\,4}{9{,}81\,.\,0{,}87^2\,.\,3{,}14\,.\,1{,}2} = 1130\ \frac{\text{Hyl}}{\text{cbm}}$$

$$\text{Absolut: } d = \frac{7900\,.\,4}{0{,}87^2\,.\,3{,}14\,.\,1{,}2\,.\,1000} = 11{,}1\ \frac{\text{g}}{\text{cm}}\,.$$

Da die technischen Einheiten von Ort zu Ort verschieden sind, so gelten Zahlen im technischen Maß natürlich nur für Karlsruhe und andere solche O wo g = 9,81 ist. Wollte man also eine Tabelle der Dichtigkeiten verschiede Stoffe zusammenstellen, so müßte diese für jeden Ort besonders berechnet werd Man erkennt hieraus deutlich den großen Vorzug des absoluten Maßsystems.

70. Eigengewicht. Das Gewicht der Volumeneinheit heißt Eigengewicht. den beiden eben behandelten Fällen hat es folgende Werte:

$$\text{Holz: Technisch: } 65\,.\,9{,}81 = 640\ \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$$

$$\text{Absolut: } 0{,}64\,.\,981 = 630\ \frac{\text{Dyn}}{\text{ccm}}$$

$$\text{Blei: Technisch: } 1130\,.\,9{,}81 = 11100\ \frac{\text{kg}}{\text{cbm}}$$

$$\text{Absolut: } 11{,}1\,.\,981 = 10500\ \frac{\text{Dyn}}{\text{ccm}}\,.$$

71. Spezifisches Gewicht. Das Verhältnis des Eigengewichts eines Körp zu dem eines anderen heißt das spezifische Gewicht des ersteren in bezug auf d letzteren. Es ist identisch mit der spezifischen Masse, d. h. dem Verhältn der Massen gleicher Volumina. Beispielsweise wäre d spezifische Gewicht von Holz bezogen auf Blei (der eben unt suchten Qualität) = 640 : 11100 = 0,0575. Gewöhnl wird das spezifische Gewicht bezogen auf Wasser. Da 1 cd Wasser 1 kg wiegt, so decken sich die Zahlen mit denjenig für die Dichte nach absolutem Maße. Beispielsweise wä das spezifische Gewicht von Holz = 0,64, dasjenige v Blei = 11,1 (reines Blei hat die Dichte 11,35).

Fig 2240.



Um die Verschiedenheit des spezifischen Gewichts zur Anschauung zu bringe kann man die Gewichte gleich großer Würfel verschiedener Substanzen b stimmen [1]).

Aus dem oben gefundenen Gewicht und dem Volumen der Erde läßt sich der mittleres Eigengewicht oder spezifisches Gewicht bestimmen. Es findet sich = 5, also wesentlich größer als das der meisten Gesteine und Erdarten. Dies wei darauf hin, daß der Kern der Erde dichter ist als die Oberfläche und daß d Innere der Erde etwa die Beschaffenheit von Meteoreisen besitzt.

Bei dünnen Drähten kann die Kenntnis des spezifischen Gewichts dazu diene deren mittleren Querschnitt zu ermitteln, dessen direkte Messung mit erhebliche Schwierigkeiten verbunden ist.

[1]) Eine Sammlung von Cubikcentimetern der wichtigsten Metalle und Legierunge stellt die Firma C. Goldbach in Heidelberg-Neuenheim her. Leppin u. Masche, Berlin Engelufer 17, liefern 12 solche Würfel in Etui (Fig. 2240) zu 20,5 Mk.

Beispielsweise ist das spezifische Gewicht von:

Platin	21,4	Eichenholz	1,2
Gold	19,2	Eis	0,9
Silber	10,5	Buchenholz	1,0
Kupfer	8,9	Tannenholz	0,9
Messing	8,4	Nußbaumholz	0,7
Eisen	7,8	Pappelholz	0,4
Glas	2,6	Kork	0,2

72. **Spezifisches Volumen.** Das Volumen der Masseneinheit heißt spezifisches Volumen. Es wäre beispielsweise in den behandelten Fällen:

$$\text{Holz: Technisch: } \frac{1}{65} = 0{,}0154 \frac{\text{cbm}}{\text{Hyl}}$$

$$\text{Absolut: } \frac{1}{0{,}64} = 1{,}57 \frac{\text{ccm}}{\text{g}}$$

$$\text{Blei: Technisch: } \frac{1}{1130} = 0{,}000885 \frac{\text{cbm}}{\text{Hyl}}$$

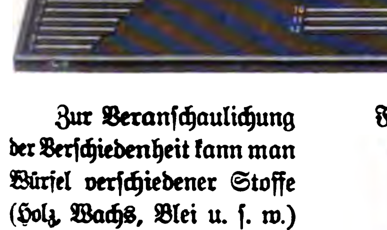
$$\text{Absolut: } \frac{1}{11{,}1} = 0{,}0905 \frac{\text{ccm}}{\text{g}}.$$

Fig. 2241.



Fig. 2242.





Zur Veranschaulichung der Verschiedenheit kann man Würfel verschiedener Stoffe (Holz, Wachs, Blei u. s. w.) herstellen, die gerade 1 kg wiegen [1]).

Fig. 2243.



Volumenometer. Für praktische Zwecke konstruierte Baeßler ein einfaches Volumenometer, welches sich auch ausgezeichnet für den Unterricht eignen dürfte, obschon natürlich nur rohe Messungen damit aus-

[1]) Eine Sammlung von Stäben gleichen absoluten Gewichts und Querschnitts stellt die Firma C. Goldbach in Heidelberg-Neuenheim her. Leppin u. Masche, Berlin, liefern eine solche Sammlung in Etui (Fig. 2241) zu 22 Mk. Leybolds Nachf. in Köln liefern Streifen verschiedener Metalle, deren Länge das spezifische Volumen darstellt, auf Pappe befestigt (Fig. 2242) zu 6 Mk.

geführt werden können. Es besteht, wie Fig. 2243 zeigt, aus einem unten trich artig erweiterten und durch einen abnehmbaren Boden verschlossenen Glascyli mit Teilung. Man füllt zunächst Sand (oder Wasser) ein bis zum Nullpunkt, 1 den Apparat um, bringt den Körper ein und stellt ihn wieder aufrecht. Der S strich, bis zu welchem der Sand (oder das Wasser) nun steht, gibt direkt Volumen des Körpers in Cubikcentimetern. (Zu beziehen von Mechaniker Kleem in Halle.) Eine ähnliche Vorrichtung zur annähernd genauen Bestimmung spezifischen Gewichts wurde von Phipson konstruiert.

73. Dehnungskoeffizient und Elastizitätsmodul. Körper, deren Form auch Anwendung beliebig großer Kräfte immer gleich bleibt, nennt man starre Kör Absolut starre Körper gibt es nicht, die wirklich vorkommenden Körper, welche mit einer gewissen Annäherung als starre verhalten, werden als feste Körper zeichnet.

Unterwirft man einen festen Körper Zug- oder Druckkräften, so scheinen die Teilchen in der Zug- bezw. Druckrichtung voneinander zu entfernen bezw. zu nähern, der Körper wird deformiert. Beim Nachlassen der Kraft geht Deformation im allgemeinen wieder zurück; sie ist, wie man sagt, eine elastis Die Kraft, mit welcher die Teilchen der Formänderung widerstehen, wird Elastizität bezeichnet. Gleiche Kräfte bringen bei gleichgestalteten Körpern v schiedener Natur verschieden große Deformationen hervor. Ebenso erfordert die zeugung derselben Deformation verschieden große Kräfte. Je größer die nöt Kraft, um so größer ist die Elastizität des Körpers. Beispiele: Kautschuk u Glas. (Nach dem gewöhnlichen Sprachgebrauche hat umgekehrt Kautschuk größere Elastizität.)

Um die Verlängerung von Kautschukstäben durch Zug zu zeigen, versieht m Stäbe aus gewöhnlichem, weichem, vulkanisiertem Kautschuk von etwa 1 bis 2 Länge und 2 bis 3 cm Durchmesser an beiden Enden mit Fassungen und Hak hängt sie vertikal auf und belastet das andere Ende durch Anhängen von Gewicht Die Verlängerungen sind so beträchtlich, daß man sie an einem dahinter aufgestell Centimetermaßstabe auch aus der Ferne bestimmen kann.

Ich benutze einen sogenannten Luftpumpenschlauch von 1,68 m Länge, welc gleichzeitig mit einem Bandmaß an dem Haken der Winde (S. 253) befestigt un bis zur Decke aufgezogen wird.

Zunächst wird darauf hingewiesen, daß selbstverständlich ein Stab von doppelt Länge durch dieselbe Kraft die doppelte Verlängerung erleidet, da sich die Ve längerungen der beiden Hälften addieren, daß dagegen ein Stab von doppelte Querschnitt nur die Hälfte der Verlängerung erfährt, insofern er aus zwei parallel Stäben von einfachem Querschnitt zusammengesetzt gedacht werden kann, auf dem jeden somit nur die halbe Kraft wirkt. Daß aber die Verlängerung der Kra proportional ist, ergibt sich ohne weiteres, indem man nacheinander 1, 2, 3 kg an hängt. So gelangt man zu dem Gesetz

$$d = n \cdot \frac{P \cdot l}{q} \text{ Meter,}$$

worin d die Verlängerung, P die Kraft, l die Länge, q den Querschnitt und n de Dehnungs- oder Elastizitätskoeffizienten bedeutet, dessen reziproker We Elastizitätsmodul (E) genannt wird. Der Wert des letzteren ergibt sich ohn

weiteres durch Messung der obigen Werte. Bei Belastung mit 2,5 kg beträgt die Verlängerung 0,3 m. Die Querschnittradien sind 0,015 und 0,005 m, somit der Querschnitt $(0{,}015^2$ bis $0{,}005^2)\frac{\pi}{4}$ qm, was leicht mittels des Rechenschiebers berechnet werden kann ($= 168{,}5 \,.\, 10^{-6}$ qm). Es ist somit:

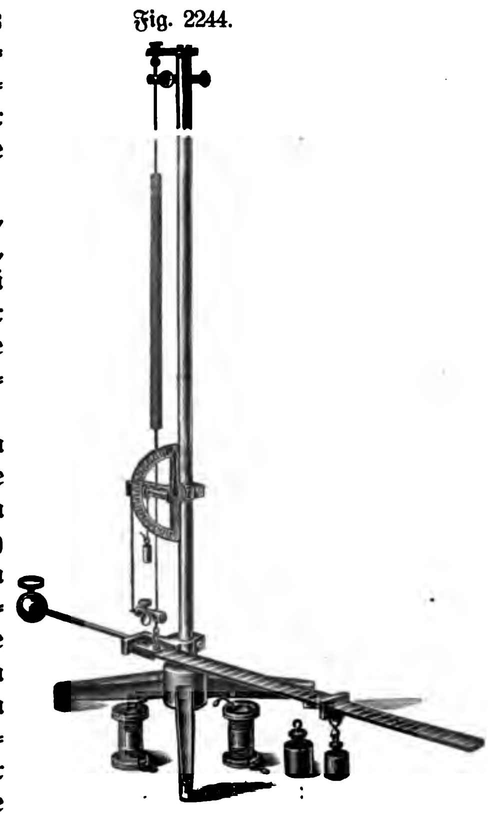
$$\text{a) Technisch: } E = \frac{P \,.\, l}{d \,.\, q} = \frac{2{,}5 \,.\, 1{,}68}{0{,}36 \,.\, 168{,}5} = 0{,}74 \,.\, 10^6 \,\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}.$$

Bezieht man denselben, wie es gewöhnlich geschieht, auf Quadratmillimeter statt Quadratmeter, so wird

$$E = 0{,}74 \,.\, 10^6 \,\frac{\text{kg}}{10^6\,\text{mm}^2} = 0{,}74 \,\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2};$$

$$\text{b) Absolut: } E = 0{,}74 \,\frac{981\,000 \text{ Dynen}}{10^{-2}\,\text{qcm}} = 0{,}725 \,.\, 10^8 \,\frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}}.$$

Fig. 2244.



Man könnte nun weiter zeigen, daß bei anderer, z. B. der halben oder doppelten Belastung, sich derselbe Wert ergibt oder richtiger, daß dies nicht der Fall ist, daß das Gesetz nur für kleine Verlängerungen gilt.

Stehen Zeit und Mittel zu Gebote, so kann man insbesondere demonstrieren, welche Gewichte notwendig sind, bei verschiedenen Querschnitten und gleicher Länge oder bei gleichem Querschnitte und verschiedener Länge dieselbe Verlängerung zu erzielen.

Bei Versuchen mit Metalldrähten besteht eine Hauptschwierigkeit darin, die kleinen Verlängerungen einem größeren Zuhörerkreise sichtbar zu machen. Nach Roiti (1877) befestigt man an dem vertikal hängenden Drahte zwei Klemmschrauben, von welchen die untere eine kleine leicht drehbare Rolle trägt, an deren Achse ein langer Zeiger von möglichst geringem Gewicht (Strohhalm u. dergl.) angebracht ist. In der oberen Klemmschraube wird das eine Ende eines Seidenfadens befestigt, der dann um die Rolle herumgeschlungen und am anderen Ende durch ein kleines Gewichtchen gespannt wird. Belastet man nun den Draht, so dehnt sich das zwischen beiden Klemmen enthaltene Stück aus, der Seidenfaden dagegen nicht, also dreht sich die Rolle und damit auch der Zeiger. Einen ganz ähnlichen Apparat hat Pierre (1884) angegeben.

Bei der in Fig. 2244 dargestellten, von Leybolds Nachf. in Köln zu beziehenden Vorrichtung wird die Ausübung starker Zugkräfte durch Hebelwirkung ermöglicht.

Einfacher benutzt man die Senkung eines horizontal gespannten Drahtes bei Anhängen eines Gewichtes in der Mitte, welche durch einen dahinter aufgestellte Maßstab leicht gemessen werden kann (Fig. 2245).

Das Gesetz vom Kräfteparallelogramm ermöglicht, aus der Größe des an gehängten Gewichtes die Spannung des Drahtes zu berechnen.

Ich gebrauche einen Messingdraht von 14,1 m Länge und 1 mm Dicke, welche sich bei Belastung mit 1 kg um 16 cm senkt. Der Querschnitt beträgt 10^{-6}. $= 0{,}785 . 10^{-6}$. Nennt man die Senkung s, so ist

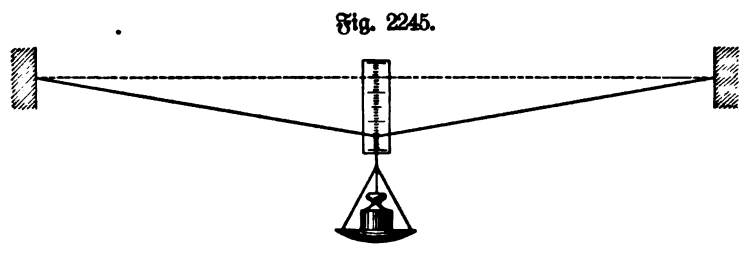
a) Technisch: $E = \frac{1}{8} \cdot \frac{P.l^3}{s^3.q} = \frac{1}{8} \cdot \frac{1 . 14{,}1^3}{0{,}16^3 . 0{,}785 . 10^{-6}} = 10800 . 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$

oder wenn q in Quadratmillimeter ausgedrückt wird: $E = 10800 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$;

b) Absolut: $E = 10800 . 98100000 = 1030000000000 \frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}}$.

Die Durchbiegung eines Körpers das Vorhandensein einer neutralen Faser die Dehnung auf der einen, die Stauchung auf der anderen Seite, demonstriert man

Fig. 2245.



am einfachsten durch Biegen eines dicken beschnittenen aber nicht eingebundenen Buches oder eines Bündels aufeinandergeschichteter, durch lose Klammern zusammengehaltener Papierblätter oder Pappdeckel.

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls durch Biegung [1]) benutze ich eine Latte aus Tannenholz von etwa 2 m Länge, 24 mm Breite (b) und 10 mm Dicke (c) welche mit der breiten Seite auf Schneiden im Abstande von 1,4 m Entfernung aufgelegt und in der Mitte mit 2,5 kg belastet wird. Es ist dann, da die Durchbiegung = 70 mm gefunden wird:

a) Technisch: $E = \frac{1}{4} \cdot \frac{P.l^3}{s . b . c^3} = \frac{2{,}5 . 1{,}4^3}{4 . 0{,}07 . 0{,}024 . 0{,}01^3} = 1040 . 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$

oder bei Bemessung von q in Quadratmillimeter: $E = 1040 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$;

b) Absolut: $E = 1040 . 98100000 = 101000000000 \frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}}$.

Beispiele anderer Elastizitätsmodule, gemessen in Kilogramm pro Quadratmillimeter gibt folgende Tabelle:

Stahl	Eisen	Kupfer	Blei	Glas
25000	17800	11900	1727	6770

Eine solche Tabelle gilt, da der Wert eines Kilogramms vom Orte abhängt,

[1]) Einen Apparat zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls durch Biegung nach Fig. 2246 liefern Leybolds Nachf. in Köln.

natürlich nur für den Ort, wo die Messungen ausgeführt wurden (die obige beispielsweise für Karlsruhe) [1]).

Man sieht auch hier die Unzweckmäßigkeit des technischen Maßsystems, insofern es unmöglich ist, bei Benutzung desselben allgemein gültige Tabellen herzustellen. Anderseits hat auch das absolute System seine Nachteile, insofern die Zahlen für den praktischen Gebrauch viel zu groß werden. Beispielsweise wäre der Elastizitätsmodul des Stahls = 1,9 Billionen CGS-Einheiten.

Fig. 2246.

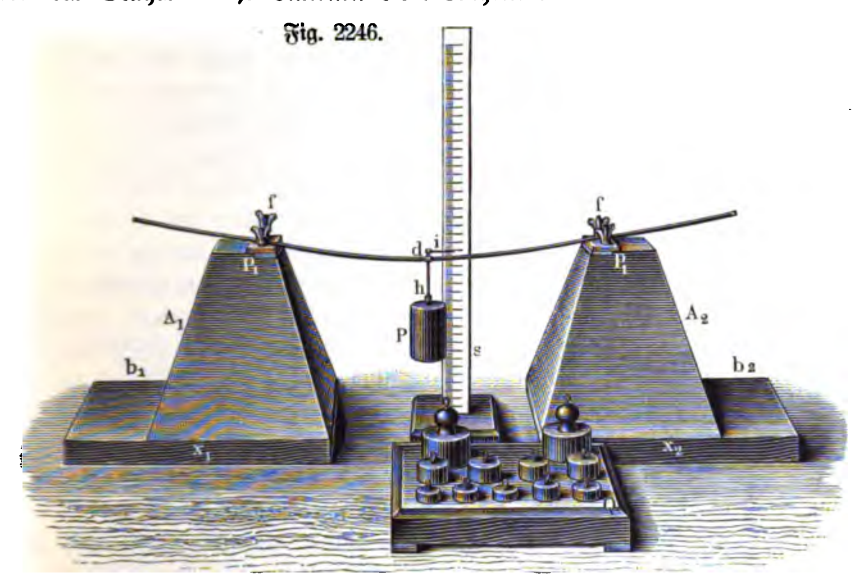


Fig. 2247.



An einer langen Spiralfeder, wie sie anfänglich als Modell der Federwage gebraucht wurde, deren Verlängerung auf der Biegung der einzelnen Windungen beruht, kann man sehr gut erkennen, daß bei successiver Belastung mit 1, 2, 3, 4, 5 kg jeweils die gleiche Verlängerung hervorgebracht wird, was bei einem einfachen Kautschukschlauch schon deshalb nicht der Fall ist, weil sich mit fortschreitender Dehnung der Querschnitt vermindert.

Den wesentlichen Unterschied zwischen der Dehnung einer Spirale und der direkten Dehnung kann man insbesondere an einer spiralig geschnittenen Flasche Fig. 2247 (K, 5) nachweisen, welche sich beim Aufheben schon durch ihr Gewicht verlängert, während eine merkliche Verlängerung der unzerschnittenen Flasche selbst durch eine große Zugkraft nicht hervorgebracht wird.

Weiter kann man hier demonstrieren Glasfäden, Glaswolle, Schlackenwolle, verschieden geformte Spiralfedern, Wagenfedern u. s. w.

Wenn oben gesagt wurde, daß bei der elastischen Dehnung die Teilchen auseinanderrücken, so muß dies dahin ergänzt werden, daß sie sich gleichzeitig näher seitlich zusammenschieben. Man kann sich hiervon z. B. überzeugen, wenn man auf einen breiten Kautschukstab einen Kreis aufzeichnet. Derselbe geht bei Streckung in

[1]) Der Elastizitätsmodul des Stahles, welcher in Paris zu 21000 angenommen werden kann, wäre in Karlsruhe 20994, in Petersburg 20973, in Madrid 21012.

eine Ellipse von gleichem Inhalt über. Eine ins Innere eingezeichnete Kugel würde sich in ein Ellipsoid verwandeln (Deformationsellipsoid). Das Wesen der elastischen Deformation besteht also darin, daß die Teilchen aneinander vorbeigleiten. In der Tat kann man elastische Verschiebungen auch ohne Änderung der äußeren Form erhalten, z. B. dadurch, daß im Inneren einer in ein starres Gefäß eingeschlossenen gallertartigen Masse ein kleiner Körper, z. B. ein Magnetstäbchen, durch aus der Ferne wirkende Kräfte verschoben oder gedreht wird. Der einfachste Fall ist offenbar der der Verschiebung der beiden Flächen einer Platte (Fig. 2248) oder der der Verdrehung der inneren Oberfläche eines Hohlcylinders gegen die äußere. Die Verschiebung erweist sich proportional der Kraft und der Dicke der Schicht und umgekehrt proportional der Fläche. Der Proportionalitätsfaktor heißt Schubkoeffizient und das Reziproke desselben der Schubmodul.

Fig. 2248.

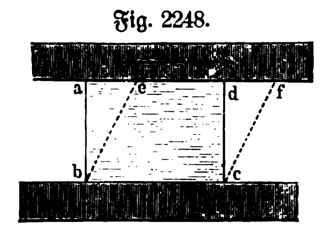
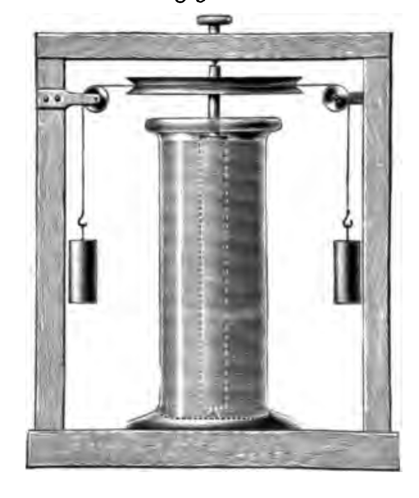


Fig. 2249.



Zur Demonstration benutze ich einen mit nicht zu steifer Leimgallerte gefüllten Standcylinder aus Glas, in welchem konaxial ein cylindrischer Stab auf einer Spitze drehbar ist. Das obere Ende läuft in eine durch den Deckel des Gefäßes hindurchgeführte dünne stählerne Achse aus, welche mittels einer daran angebrachten Schnurscheibe durch belastete Gewichte gedreht werden kann (Fig. 2249).

Der Boden des Standcylinders wurde vor dem Einbringen der noch flüssigen Leimlösung mit Quecksilber bedeckt, um Anhaften der Gallerte zu hindern.

Seien r_1 und r_2 die Radien des äußeren bezw. inneren Cylinderquerschnittes, l die Cylinderhöhe, P die drehende Kraft, R der Radius der Schnurscheibe, α der Drehungswinkel in absolutem Maß (Bogen von Radius 1 m) und F der Schubmodul, so ist annähernd:

$$F = \frac{(r_1 - r_2)\,P\,.\,R}{\alpha r_2\,.\,l\,.\,2\pi r_2\,.\,r_2} \text{ Kilogramm pro Quadratmeter.}$$

Gemessen wurde: $r_1 = 0{,}047$ m, $r_2 = 0{,}0165$ m, $P = 1$ kg, $R = 0{,}11$ m, $\alpha = 0{,}28$, $l = 0{,}33$.

Es ist somit:

a) Technisch: $F = \frac{(0{,}047 - 0{,}0165)\,.\,1\,.\,0{,}11}{0{,}28\,.\,0{,}33\,.\,6{,}28\,.\,0{,}0165^3} = 1400 \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$

oder bezogen auf Millimeter: $0{,}0014 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}}$;

b) Absolut: $F = 0{,}0014\,.\,98100000 = 138000 \frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}}$.

Bei härteren Materialien dient zur Bestimmung des Schubmoduls die Torsion eines cylindrischen Stabes, welche aufgefaßt werden kann als Verdrehung von Scheiben übereinander. Dabei gilt die Formel (siehe Kohlrausch S. 206):

$$F = \frac{2 \,.\, l \,.\, P \,.\, R}{\pi \,.\, r^4 \,.\, \alpha} \text{ Kilogramm pro Quadratmeter.}$$

Ich benutze zu dem Versuche einen an der Decke befestigten Messingdraht von 2 mm Durchmesser, dessen unteres Ende durch ein Gewicht beschwert und in eine Torsionsvorrichtung, bestehend aus einer Schnurscheibe mit zwei Schnüren, eingeklemmt ist (wie bei Fig. 2250). Zur Ablesung des Drehungswinkels wird an der Schnurscheibe ein 1 m langer Zeiger aus Stahl- und Aluminiumrohr befestigt. α bedeutet den Weg der Zeigerspitze in Metern. Ein Versuch ergab beispielsweise: $P = 0{,}04$ kg, $R = 0{,}11$ m, $l = 4{,}2$ m, $\alpha = 3{,}5$, $r = 0{,}001$ m, somit:

a) Technisch: $F = \frac{2 \,.\, 4{,}2 \,.\, 0{,}04 \,.\, 0{,}11}{3{,}14 \,.\, 0{,}001^4 \,.\, 3{,}5} = 3380 \,.\, 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$,

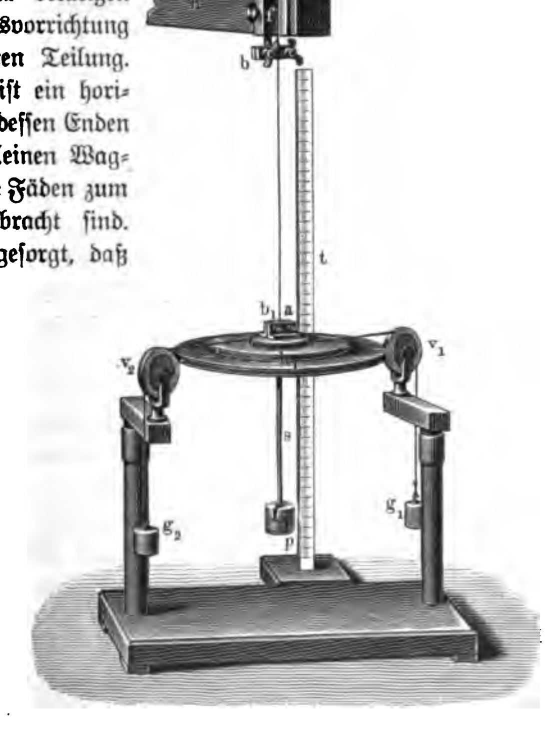
oder wenn der Querschnitt in Quadratmillimetern gemessen wird:

$$F = 3380 \frac{\text{kg}}{\text{qmm}};$$

b) Absolut: $F = 3380 \,.\, 98100000 = 331000000000 \frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}}$.

Eine andere Vorrichtung zur Bestimmung der Torsionselastizität, welche ich gebrauche, besteht aus einem etwa 6 m langen, 3 mm starken Messingdraht, dessen oberes Ende in der an der Decke befestigten Torsionsvorrichtung (S. 17 u. 253) befestigt ist, welche sich von unten aus mittels eines über Rollen geführten Seiles betätigen läßt. Der Zeiger der Torsionsvorrichtung spielt auf einer weithin sichtbaren Teilung. Am unteren Ende des Drahtes ist ein horizontaler Messingstab befestigt, an dessen Enden über Rollen geführte und mit kleinen Wagschalen aus Aluminium beschwerte Fäden zum Messen der Torsionskraft angebracht sind. Durch eine Arretierung ist dafür gesorgt, daß bei Belastung der Stab nicht über die Anfangslage hinausgehen kann. Man richtet den Versuch zweckmäßig so ein, daß man zunächst den Zeiger auf Null bringt, nun die Arretierung an den Stab anlegt, sodann die Gewichte in die Wagschalen legt und zeigt, daß die Torsion, welche erforderlich ist, den Stab eben außer Berührung mit der Arretierung zu bringen, den angewandten Gewichten proportional ist.

Fig. 2250.

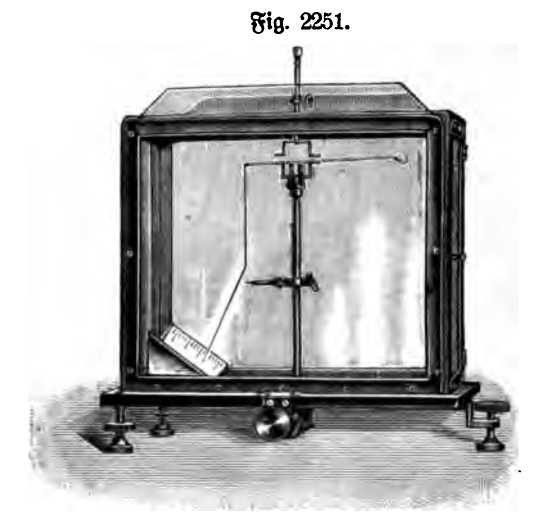


Eine andere zu gleichem Zwecke dienende Vorrichtung [1])

[1]) Zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln

nach E. Wiedemann zeigt Fig. 2250. Man kann mittels derselben namentlich auch zeigen, daß das Anhängen eines beliebig großen Gewichtes an den Draht ohne Einfluß auf die Torsionskraft ist; daß ferner bei Verwendung eines Drahtes von halbem Durchmesser zur Erzeugung derselben Verdrillung nur der sechszehnte Teil der früheren Kraft erforderlich ist, namentlich aber, daß Belastung mit 10, 20, 30, 40 g u. s. w. die 1, 2, 3, 4 ... fache Torsion hervorbringt. Ganz wie bei einer gewöhnlichen Federwage haben also auch bei einer Torsionswage die Teilstriche gleichen Abstand, so daß man bei der Eichung nur wenige Punkte zu bestimmen braucht. Weil die Kraft umgekehrt proportional ist der vierten Potenz des Querschnittradius, eignet sich die Torsionswage für die feinsten Messungen, besonders bei Anwendung äußerst feiner Quarzfäden. (Vergl. S. 605 und 736.)

Fig. 2251.



Die Mikrowage von Nernst, Fig. 2251, besteht aus einer 30 cm langen, 0,5 mm dicken Glaskapillare, welche mit Wasserglas an einen horizontal gespannten feinen Quarzfaden angeklebt ist, diesen also bei der Drehung tordiert[1]). Sie gestattet Gewichte bis 2 mg mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 Tausendstel Milligramm zu bestimmen.

Die Mikrowage von Salvioni[2]) beruht auf der Biegung eines sehr feinen Glasfadens und gestattet den Nachweis von Massen unter 0,001 mg.

74. Isotropie und Anisotropie. Je nachdem die Elastizität in verschiedenen Richtungen gleich oder ungleich ist, unterscheidet man isotrope und anisotrope Körper. Als Beispiele können dienen Glas und Holz. Stäbchen aus demselben Brett (Hartholz) in verschiedenen Richtungen geschnitten, erfordern zur gleichen Durchbiegung verschieden große Kräfte. Homogene anisotrope Körper sind die normalen[3]) Kristalle.

Je nach dem Grade der Symmetrie in der Verteilung der Elastizität teilt man sie in Gruppen, Kristallsysteme.

Bis zu gewissem Grade lassen sich diese Abteilungen durch Modelle veranschaulichen. Man kann namentlich durch entsprechend hergestellte Geflechte aus Drahtspiralen das Verhalten ebener Kristallplatten andeuten, doch erscheint dies kaum nötig.

Durch Tafeln oder Gipsmodelle kann man die Verteilung der Werte der Elastizität nach den verschiedenen Richtungen darstellen; ferner wäre das Elastizitätsellipsoid zu demonstrieren, dessen Radien die Kräfte angeben, welche nötig sind, um einem Punkt im Inneren eines unendlich groß gedachten Kristalles eine bestimmte Verschiebung mitzuteilen u. s. w.

---

[1]) Sie wird geliefert von Diederichs (Spindler u. Hoyer), Werkstätte für wissenschaftliche Präzisionsinstrumente Göttingen, zu 80 Mk. — [2]) Naturwissensch. Rundschau 17, 504, 1902. — [3]) Homogenität gehört nicht zum Kristallbegriff. Gewundene Quarzkristalle sind nicht homogen und dennoch zweifellos Kristalle; ebenso Sphärokristalle. Vergl. O. L., Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann.

75. Deformationsarbeit. Da sich durch Multiplikation von Kraft und Weg die Arbeit ergibt, kann man leicht die bei Dehnung oder Stauchung eines elastischen Körpers geleistete Arbeit berechnen. Dies erscheint von um so größerem Interesse, als die in einer gespannten Feder aufgezeichnete Energie ein Analogon der Energie einer Leidener Flasche ist.

Wird ein Kautschukschlauch mit einem Gewicht von 1 kg belastet und dehnt sich dabei um 0,2 m aus, so ist die Arbeit, da die mittlere Spannung 0,5 kg betrug, $0{,}5 \,.\, 0{,}2 = 0{,}1$ kgm.

Als Demonstrationsobjekt kann ein großer Kautschukstopfen in einer Schraubenpresse dienen. Sei die Dicke l Meter, der Querschnitt q Quadratmeter und die Stauchung d Meter, so ist die geleistete Arbeit, da der Druck allmählich von 0 bis $q \,.\, H = E \cdot \frac{d \,.\, q \,.\, 10^6}{l}$ kg anwächst, also im Mittel den Wert $\frac{E}{2} \cdot \frac{d \,.\, 10^6 \,.\, q}{l}$ besitzt: $A = \frac{E}{2} \cdot \frac{d \,.\, q \,.\, 10^6 \,.\, d}{l} = \frac{E}{2} \cdot \frac{q \,.\, 10^6}{l} \left(\frac{H \,.\, 10^{-6} \,.\, l}{E}\right)^2 = \frac{10^{-6}}{2 \,.\, E} \cdot v \cdot H^2$ Kilogrammmeter[1]). Die spezifische Energie (Energie pro cbm) ist der v te Teil.

In absoluten Einheiten ergibt sich einfacher der mittlere Druck $= \frac{E}{2} \cdot \frac{d \,.\, q}{l} \frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}}$, die Arbeit $= \frac{E}{2} \cdot \frac{q}{l} \cdot d^2$ oder da $q \,.\, H = \frac{E}{2} \cdot \frac{d \,.\, q}{l}$ also $d = \frac{2 l H}{E}$, die Arbeit $= \frac{E}{2} \cdot \frac{q}{l} \cdot \frac{4 l^2 H^2}{E^2} = 2 \cdot \frac{v}{E} \cdot H^2$ Erg. Die spezifische Energie beträgt $\frac{2}{E} \cdot H^2$ Erg.

Einfacher gestaltet sich z. B. die Berechnung beim Aufziehen einer Uhrfeder. Als Demonstrationsobjekt benutze ich einen großen Federmotor, wie er früher zum Betrieb von Nähmaschinen gebraucht wurde. Beträgt die Kraft an der Kurbel k kg, ist der Radius der Kurbel $= r$, die Zahl der Umdrehungen $= n$, so ist die aufgespeicherte Energie $k \,.\, 2 \pi r \,.\, n$ Kilogrammmeter. Man könnte also auf dem Federgehäuse eine Skala anbringen, an welcher sich der vorhandene aufgespeicherte Energievorrat ablesen läßt. K ist freilich nur in engen Grenzen konstant.

76. Das Prinzip der kleinsten Deformationsarbeit. Sind bei einer unterstützten Platte überzählige Stützpunkte vorhanden, so ist die Druckverteilung derart, daß die Deformationsarbeit ein Minimum wird. Am einfachsten wäre dies wohl nachzuweisen mittels einer an vier Spiralfedern aufgehängten Platte, welche sich in vier Teile zerlegen läßt. Die Federn müßten dann so graduiert sein, daß sie nicht wie Federwagen die Kräfte, sondern die zu ihrer Spannung verbrauchte Arbeit angeben. Das Gewicht der Platte kann in verschiedener Weise auf die vier Aufhängepunkte verteilt gedacht werden, z. B. so, wie es der zerlegten oder wie es der ganzen Platte entspricht. In jedem Falle ist die Summe der vier Deformationsarbeiten eine andere, im letzteren aber die kleinste.

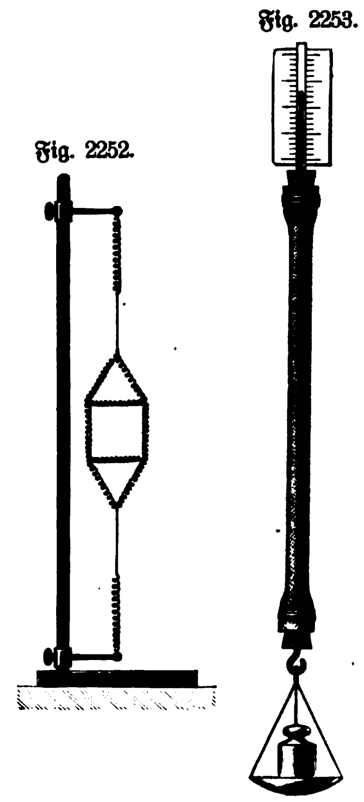
Nach diesem Prinzip läßt sich z. B. der Druck der vier Füße eines beliebig belasteten gewöhnlichen Tisches auf den Boden ermitteln oder der Druck einer langen Welle auf die Lager u. s. w.

---

[1]) Der Elastizitätsmodul ist proportional zur Fallbeschleunigung, man kann somit setzen $E = \varepsilon \,.\, g \,.\, 10^{-6}$. Dann wird $A = \frac{1}{2g} \cdot \frac{v}{\varepsilon} \cdot H^2$ Kilogrammmeter, eine Formel, welche derjenigen, die die Energie einer Leidener Flasche darstellt, ganz analog ist.

77. Die Elastizitätszahl. Wird ein Kautschukschlauch gedehnt, so zieht sich allerdings in der Querrichtung zusammen, wie dies der Verteilung der Dr kräfte entspricht, die man etwa durch ein Modell, wie Fig. 2252, anschaulich mac könnte.

Diese Querkontraktion ist indes geringer, als der Konstanz des Volumens e sprechen würde, das Volumen wird also größer.


Fig. 2252. Fig. 2253.

Zum Nachweis benutze ich einen weiten un geschlossenen Kautschukschlauch, an welchen ol mittels eines durchbohrten Stopfens eine enge Gl röhre angesetzt ist (Fig. 2253). Derselbe wird r gefärbtem Wasser gefüllt und sodann durch ein a gehängtes Gewicht gedehnt. Man sieht (auch a großer Entfernung) das Wasser in der Röl sinken, woraus folgt, daß sich das Volumen v größert hat.

Nach Poissons Theorie ist $F = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{1 +}$ wenn μ das Verhältnis der Querkontrakti zur Längenausdehnung (Elastizitätszahl) l beutet, F den Schubmodul und E den Dehnung modul.

Ein quadratischer Stab von l Meter Län und b Meter Dicke, dessen Volumen ursprüngl $l . b^2$ war, vergrößert bei der Dehnung mit t Kraft K um d Meter sein Volumen auf $l(1 +$ $(b . [1 - \mu d])^2$, die Volumenzunahme beträgt al $l b^2 . d (1 - 2\mu)$ und pro Cubikmeter: $d(1 - 2$ $= \frac{K'}{E}(1 - 2\mu)$, wenn K' die Kraft pro Quadr millimeter bedeutet. Ebensogroß ist die Volume abnahme bei Kompression.

78. Kompressibilität fester Körper. Bei allseitigem Zug oder Druck wi die Volumenänderung (die cubische Dilatation) $\frac{K'}{E} 3(1 - 2\mu)$, wobei μ We zwischen 0 und $^1/_2$ annehmen kann, die von dem Material abhängen.

Kompression nennt man das Verhältnis der Dichtigkeitszunahme zur u sprünglichen Dichtigkeit, Zusammendrückbarkeit das Verhältnis von Kon pression zur Druckzunahme und Volumenelastizität den reziproken Wert d Zusammendrückbarkeit.

Die meisten festen Körper erleiden beim Komprimieren eine bleibende Ve dichtung, die daher rührt, daß in dem Körper Risse oder kleine Hohlräume enthalte sind (insbesondere bei Metallen), die beim Kromprimieren verschwinden, indem hierb die einzelnen, den Körper zusammensetzenden Teile derart deformiert werden, da sie sich dicht aneinander schmiegen. Sobald nun aber diese Hohlräume verschwunde sind, zeigen die Körper nur noch äußerst geringe Zusammendrückbarkeit, weld beispielsweise beträgt für

Blei	Glas	Messing	Stahl
$2{,}761 . 10^{-6}$	$2{,}197 . 10^{-6}$	$0{,}953 . 10^{-6}$	$0{,}680 . 10^{-6}$,

d. h. eine Druckzunahme von 1 kg pro Quadratcentimeter Oberfläche bedingt eine Verminderung des Volumens um 1 bis 2 Milliontel seines Wertes.

Für Blei ist hiernach die Kompressibilität:

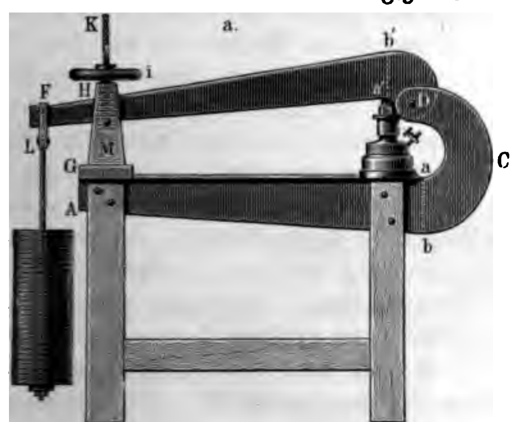
$$\text{Technisch: } 2{,}761 . 10^{-10} \frac{\text{cbm}}{\text{cbm} . \text{kg}},$$

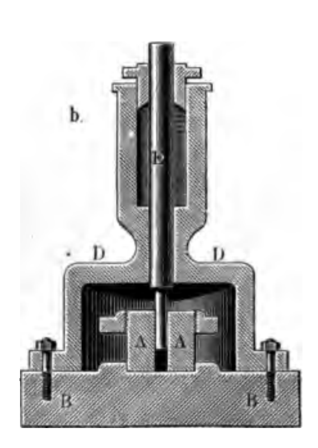
$$\text{Absolut: } 2{,}82 . 10^{-12} \frac{\text{ccm}}{\text{ccm} . \text{Dynen}}.$$

Beim Nachlassen der Kraft wird die Volumenänderung wieder vollständig rückgängig, d. h. die Volumenelastizität ist stets eine vollkommene.

Es gilt dies ebensowohl für vollkommen elastische, wie für möglichst unelastische Körper. Die Volumenelastizität ist somit eine Erscheinung, die mit der Verschiebungselastizität eines Körpers in keiner Beziehung steht [1]).

Fig. 2254.





Man kann die Erscheinung demonstrieren mit dem Apparate von W. Spring (Fig. 2254), indem man zeigt, daß anfänglich durch Kompression das spezifische Gewicht eines Körpers steigt, daß aber mit zunehmendem Drucke eine Grenze erreicht wird, von welcher an die Dichte konstant bleibt. Daß während des Druckes das Volumen kleiner ist als vorher oder nachher, kann wegen der elastischen Ausbauchung der Cylinderwände nicht unmittelbar gezeigt werden, da aber gleiche Druckkräfte gleiche Ausbauchungen hervorrufen, verschiedene Substanzen aber in verschiedenem Maße ihr Volumen verkleinern, so folgt, daß diese scheinbare Volumenverminderung nicht allein auf Ausbauchung der Cylinderwände zurückzuführen ist, sondern auch eine wahre Kompressibilität der festen Körper existiert.

Der Apparat von W. Spring (zu beziehen von M. Kohl in Chemnitz) besteht aus einem soliden Gestell aus Gußeisen und Eichenholz, welches hinreichend kräftig ist, um an der Stelle, wo der Druck ausgeübt wird, einer Pressung von 30 000 Atmosphären zu widerstehen. Der Hauptteil ist ein eiserner Träger (Fig. 2254)

[1]) Mit Rücksicht auf die kinetische Theorie und das S. 666 Gesagte kann man Volumenelastizität als System von Trägheitskräften betrachten, Verschiebungselastizität dagegen als wahre Kraft. Durch Volumenelastizität wird die aufgewandte mechanische Arbeit in Wärme umgesetzt, durch Verschiebungselastizität in potentielle Energie.

von T-förmigem Querschnitt von 1,3 m Länge und 3 cm Dicke, welcher bei *ab* eine Höhe von 24 cm, bei *A* von 18 cm besitzt. Derselbe wird von vier eichenen Füßen getragen, welche unter sich durch Querstäbe verbunden sind. (Höhe 1,03 m.) Der eiserne Träger krümmt sich von *ab* an, wie die Figur zeigt, um schließlich in einem Gelenke zu endigen, durch welches der Hebel, der den Druck ausüben soll, damit verbunden ist. Dieser besteht aus Schmiedeeisen, ist zwischen Unterstützungspunkt und Angriffspunkt der Kraft 1,5 m lang und 2 cm dick und an der gefährlichsten Stelle *a' b'* 20 cm breit, am äußersten Ende dagegen nur 5 cm. Dieses freie Ende gleitet in einer Führung und kann mittels eines Bügels und der Schraube *K* so langsam, wie nötig, gesenkt werden. Die Gewichtstücke zum Belasten des Hebels sind gußeiserne Scheiben mit Schlitz, die auf einen Träger *L* aufgeschichtet werden. Der Teil des Apparates, in welchem der Druck ausgeübt wird, in Fig. 2254 b besonders abgebildet, besteht aus Gußstahl und ist ein Cylinder von 38 mm Durchmesser und 50 mm Höhe, längs der Achse durchschnitten und der Länge nach genau in der Achse durchbohrt. Die Zweiteilung ist nötig, um die gepreßten Substanzen leicht herausnehmen zu können. Die beiden Hälften des Cylinders passen genau in eine Höhlung des Gußstückes *BB* von 22 cm Durchmesser und 5 cm Dicke, welches bei *a*, Fig. 2254 a, angebracht ist. Um zu verhindern, daß die beiden Hälften des Cylinders oben auseinander weichen, ist die äußere Fläche des Cylinders *A* konisch gearbeitet und eine kräftige Schraubenmutter von 9 cm Durchmesser gestattet, die beiden Teile unveränderlich fest gegeneinander anzuziehen. In die Höhlung wird ein kleiner Kolben eingetrieben, auf welchen die Kraft mittels des Hebels ausgeübt wird. Das Gußstück *BB* ist bedeckt mit einer Messingglocke *D*, mit einer Stopfbüchse versehen, durch welche ein Stahlstempel *E* von 2 cm Durchmesser hindurchgeht, der den Druck direkt von dem Hebel empfängt. Dieser drückt dann seinerseits auf den Kolben, welcher die Substanz, die in die Höhlung hineingestopft wird, zusammenpreßt. Die messingene Glocke läßt sich durch einen Hahn mit der Luftpumpe verbinden, was indes bei diesen Versuchen unnötig ist. Liegt nur der Hebel allein auf, so beträgt der Druck infolge des Eigengewichtes des Hebels 260 Atmosphären (da nämlich der Druck = 130 kg und der Durchmesser des Cylinders = 9 mm). Würde der Hebel mit 1000 kg belastet, so betrüge der Druck 25 520 Atmosphären. Zulässig ist indes nur ein Druck von 10 000 Atmosphären, da der Kolben für stärkere Drucke nicht genügend Widerstandskraft besitzt.

79. Umwandlung durch Druck. Körper mit mehreren physikalisch isomeren Modifikationen erleiden unter Umständen im Apparate von W. Spring, einem genügend starken Drucke ausgesetzt, Umwandlung in die **dichtere Modifikation**. Als Beispiele sind zu nennen: Jodsilber und Schwefel.

Im Falle von Jodsilber wird die Umwandlung beim Nachlassen des Druckes wieder rückgängig. Die Umwandlung ist also eine **enantiotrope**. In anderen Fällen (auch bei Schwefel) ist die eine Modifikation überhaupt labil, die andere stabil, die Umwandlung ist irreversibel oder **monotrop**.

80. Verflüssigung und Erstarrung durch Druck. Die Verflüssigung des Eises durch Druck zeigt man mit dem Apparate von Mousson, Fig. 2255 und 2256 (Lb, 40). Ein Stahlstück *A* enthält einen 5 bis 6 mm weiten cylindrischen Kanal *a*, der sich oben sehr langsam, unten stärker konisch erweitert. In diesen Kanal paßt

genau ein langer Kupferstöpsel α, der mittels des Stahlstempels β durch eine starke Überwurfmutter B mittels eines langen Schlüssels C eingetrieben wird. Als Index dient ein kleiner Messingcylinder γ, welchen man einbringt, nachdem der Raum a mit Wasser gefüllt ist. Man läßt letzteres gefrieren, was im Winter leicht zu bewerkstelligen ist, setzt dann den Kupferkonus δ ein und zieht denselben mit der Schraube b fest an. Gibt man nun durch Anziehen der Überwurfmutter Druck, kehrt den Apparat um und öffnet, so zeigt sich, daß der Messingindex durch das Eis hindurch gefallen ist, d. h. letzteres geschmolzen gewesen sein muß.

Eisstücke in zweischalige Formen aus Buchsbaumholz (Lb, 6) eingelegt, lassen sich leicht mittels einer kleinen hydraulischen Presse so deformieren, daß sie genau

Fig. 2255. Fig. 2257.

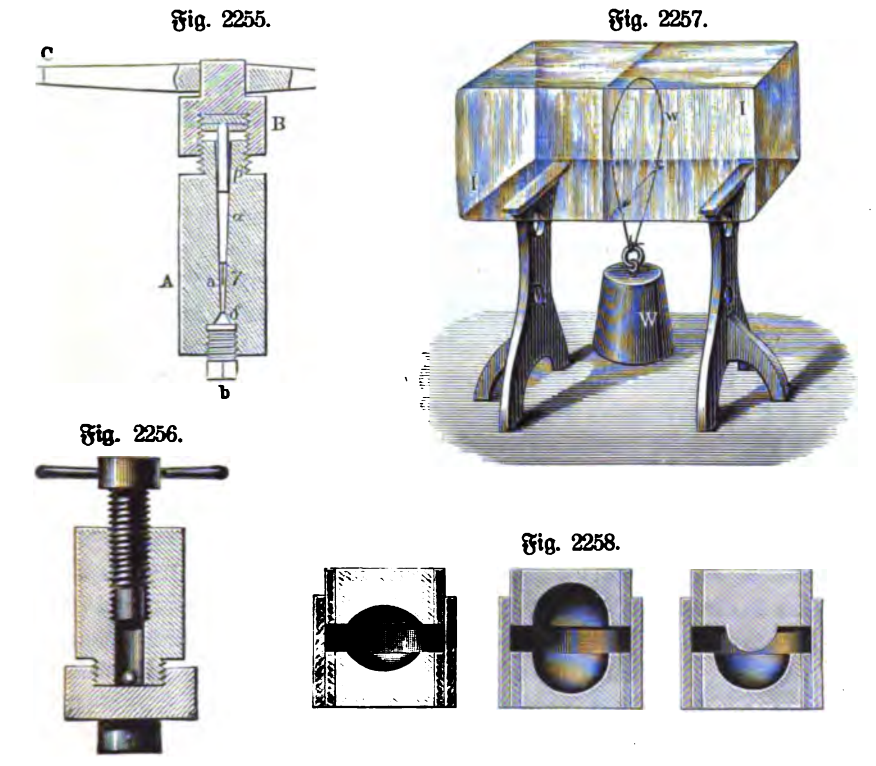


Fig. 2256.

Fig. 2258.

die Gestalt der Form annehmen. Anfangs zerspringt die Masse unter Krachen, bald aber hört man nur noch ein eigentümliches Ächzen infolge der zahlreichen Risse und Verschiebungen und beim Trennen der Form sieht man einen zusammenhängenden, wenn auch nicht durchsichtigen, so doch durchscheinenden Körper, der dieselbe Festigkeit wie nicht deformiertes Eis besitzt.

Hängt man nach Bottomley über einen beiderseits unterstützten Eisblock eine Drahtschleife, welche man durch ein Gewicht spannt (Fig. 2257), so schneidet der Draht in das Eis ein und durchdringt schließlich den ganzen Block, ähnlich wie die Drahtschlinge der Seifensieder einen Seifenblock. Während aber letzterer nach dem Durchdringen des Drahtes in zwei Teile zerschnitten ist, hängt der Eisblock nach wie vor zusammen[1]).

[1]) Den Apparat (Fig. 2257) liefern Leybolds Nachf. in Köln, ebenso die Formen Fig. 2258.

Tyndall preßt einen Eiscylinder zwischen zwei Buchsbaumplatten und zeigt das Auftreten von wassererfüllten Schichten. Beim Krümmen eines Eisstückes zeigen sich solche nur auf der konkaven Seite (Regelation, Gletscherbewegung).

81. Plastizität. Wird ein Körper elastisch deformiert, so sind in jedem Punkte desselben innere Spannungen vorhanden. Die Deformation ist nur dann eine elastische, wenn auch die größte dieser Spannungen einen gewissen Betrag, die Elastizitätsgrenze, nicht überschreitet.

Beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze tritt eine bleibende, mit der Zeit zunehmende Deformation ein.

Zur Demonstration eignet sich besonders Marineleim. Einige Kilogramm davon bringt man zu Beginn der Vorlesung auf ein hohes Stativ, sie fließen dann durch ihr eigenes Gewicht während der Vorlesung herunter. Eventuell kann man auch das rasche Einsinken eines aufgelegten schweren Gewichtes zeigen, oder das Aufsteigen von Kork, welcher darunter gebracht wurde.

Die bleibende, mit der Zeit fortschreitende Verlängerung von Metalldrähten läßt sich sehr gut bei ganz weichen (d. h. gut ausgeglühten, aus reinem Metall bestehenden) Kupferdrähten zeigen. Ein solcher Draht von etwa 1 mm Durchmesser und 1 m Länge kann schon lediglich dadurch, daß man ihn einigemale kräftig durch die Finger zieht, erheblich verlängert werden, durch Anhängen von Gewichten sogar um mehrere Centimeter; ähnlich auch Bleidraht oder enge Bleiröhren. Ein anderes zur Demonstration sehr geeignetes Material ist der nicht vulkanisierte Kautschuk, wobei dann gleichzeitig der Unterschied zwischen vulkanisiertem und nichtvulkanisiertem klar hervortritt.

Mechanische Arbeiten, welche als Beispiele plastischer Deformation hier angeführt werden können, wären das Prägen, Treiben, Nieten, Punzen, Rändeln, Ton- und Wachsmodellieren, Blattgoldschlagen, Polieren mit dem Polierstahl, Biegen und Spannen von Drähten, Falzen von Blech, das Stanzen von Metallpatronenhülsen, Walzen von Mannesmannröhren, Pressen von Bleiröhren, das Durchschießen von Panzerplatten, die Versuche von Tresca, Kick, Rudeloff u. s. w.

Fig. 2259.

Als Demonstrationsobjekte kann man Walz-, Zieh-, Präge- und Stanzmaschinen demonstrieren.

82. Tragmodul. Zur Demonstration bediene ich mich der folgenden Vorrichtung. Am Haken der Winde wird ein Bleidraht von 3,5 mm Durchmesser befestigt und bis zur Zimmerdecke (6 m) aufgezogen. An das untere Ende wird eine Wagschale angehängt, und zunächst schwach belastet. Nun schiebt man darunter ein Stativ, dessen Tisch sich in die Höhe schrauben läßt (Bohrmaschinentisch, Fig. 2259). Man schraubt ihn soweit empor, daß die Wagschale aufsteht, legt dann das dem Tragmodul entsprechende Gewicht P auf (9 kg) und schraubt ihn dann wieder einige Centimeter herunter. Nach einigen Minuten hat sich der Draht soweit gestreckt, daß die Wagschale, welche man zweckmäßig der besseren Beobachtung halber in Schwingungen versetzt, aufsitzt. Nun schraubt man das Stativ wieder einige

Centimeter tiefer u. s. w., bis schließlich (infolge der Verminderung des Querschnittes) der Draht den Zug nicht mehr ertragen kann und durchreißt.

Der Tragmodul ist, wenn q den Querschnitt bedeutet:

$$\text{Technisch: } T = \frac{P}{q} = \frac{q}{\frac{\pi}{4} \cdot 3{,}5^2 . 10^{-6}} = 0{,}94 . 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{qm}}$$

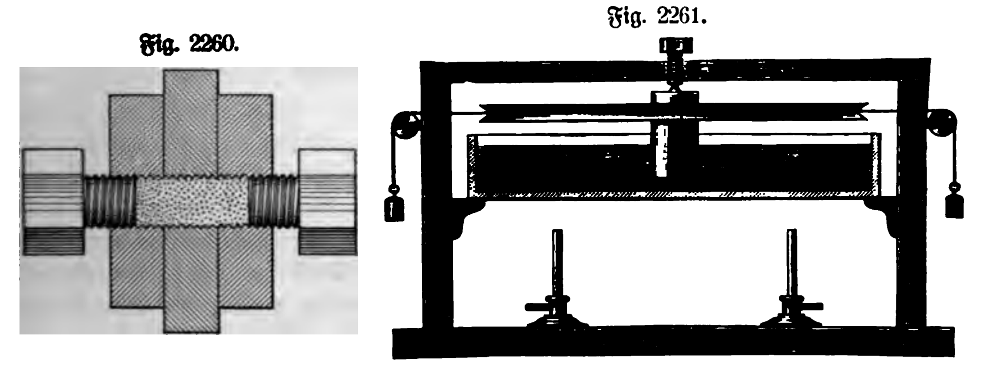
oder wenn q in Quadratmillimeter gemessen wird: 0,94;

$$\text{Absolut: } = 0{,}94 . 9{,}81 . 10^7 \frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}} .$$

Eventuell kann man noch demonstrieren, daß der Tragmodul unabhängig ist von der Länge des Drahtes.

83. Schubfestigkeit. Bezüglich der Fundamentalerscheinung der Plastizität gilt das schon bezüglich der Elastizität Gesagte. Es gibt Fälle, in welchen die

Fig. 2260. Fig. 2261.



plastische Deformation nicht mit einer Gestaltänderung verbunden ist — dieselben wie bei elastischer Deformation — und diese müssen deshalb als die einfachsten betrachtet werden.

Die „Schubfestigkeit" ist die Elastizitätsgrenze für das Gleiten der Teilchen (wie bei Bestimmung des Schubmoduls).

Zur Demonstration kann die Drahtschere (Rundeisenabschneider) dienen, welche man dadurch, daß man auf das Hebelende ein Gewicht oder unter Zwischenschaltung eines Dynamometers irgend eine andere Kraft wirken läßt, in einen Meßapparat verwandelt.

Um genaue Resultate zu erhalten, müßte allerdings der abzuschercnde Stab in axialer Richtung zusammengedrückt werden mit solcher Kraft, daß ein Zusammenquetschen desselben an der Schnittstelle infolge auftretender Zugspannungen unmöglich wird.

Nach Versuchen von Webbing läßt sich dies z. B. bei Blei erreichen, indem man nur ganz kurze Stäbe benutzt, welche beiderseits an Schrauben angrenzen, die sich in die Öffnungen der Scherblätter hineintreiben lassen (Fig. 2260).

Ferner kann man den zur Bestimmung des Schubmoduls der Gallerte gebrauchten Apparat oder einen ähnlichen benutzen, welchen man statt mit Gallerte mit Marineleim füllt.

Ich benutze eine große, flache, eiserne Schale (Fig. 2261), deren Boden mit Quecksilber bedeckt wird, auf dessen Oberfläche eine etwa 2 bis 3 cm dicke Schicht

von Marineleim liegt. Durch einen in der Mitte eingesetzten, zwischen Spitzen dre baren, mit Schnurlauf versehenen Eisencylinder kann dieser plattenförmigen Ma von Marineleim eine Torsion erteilt werden. Auf der Oberfläche bilden sich da spiralförmig verlaufende Riefen, welche die Richtung der Kraftlinien, d. h. d Richtung, in welcher Zugspannung herrscht, angeben.

Zieht man Spiralen, welche senkrecht zu diesen Kraftlinien verlaufen, so erh man die Richtungen der Druckkräfte. Man kann sich die Masse gewissermaßen a gespannten elastischen Fäden zusammengesetzt denken, welche die Richtung der Kra linien haben und gegenseitig aufeinander drücken. Die Folge dieses Druckes, der der Mitte am stärksten ist, ist eine Vergrößerung der Dicke der Platte in der Mit dort werden die Fäden gewissermaßen auf den sich drehenden Cylinder aufgehaspe so daß die Masse dort emporsteigt, während die Platte am Rande sich immer me und mehr verdünnt, bis nur noch ein sehr dünnes Häutchen übrig bleibt, welch keinen Widerstand mehr leisten kann.

84. Innere Reibung oder Viskosität. Ist die Schubfestigkeit überschritten, erfolgt die Deformation um so rascher, je größere Kräfte man wirken läßt, od um eine gewisse Geschwindigkeit v der Deformation zu erzielen, ist eine zu v pr portionale Kraft erforderlich, welche man die innere Reibung oder Viskosit nennt. Sie sollte eigentlich gleich Null sein, wenn v gleich Null, d. h. wenn d Kraft gerade gleich der Schubfestigkeit ist, so daß also die Gesamtkraft gleich Schu festigkeit + Viskosität wäre. Aus den Erscheinungen der elastischen Nachwirkun scheint aber zu folgen, daß (wenigstens bei manchen Körpern) auch schon unterha der Elastizitätsgrenze innere Reibung auftritt, somit unter v nicht die Geschwindig keit der plastischen Deformation, sondern die der Deformation überhaupt zu ve stehen ist.

Zur Demonstration und Messung der inneren Reibung kann ebenfalls d Apparat zur Torsion von Marineleim benutzt werden.

Je größer die zur Erzeugung einer bestimmten Deformation mit vorgeschri bener Geschwindigkeit nötige Kraft, um so größer ist die Zähigkeit (Viskositä des Stoffes.

Diejenige Kraft in Kilogramm, welche bei 1 qm Querschnitt und 1 m Höh pro Sekunde eine Verschiebung um 1 m bedingt, ist der Koeffizient der innere Reibung im technischen Maße.

Im absoluten Maße ist er die Kraft in Dynen bei 1 cm Querschnitt, 1 c Höhe und 1 cm Verschiebung pro Sekunde. Genaue Messungen sind aber infol verschiedener Fehlerquellen schwierig auszuführen.

Man kann hier ferner erwähnen die Versuche von Tresca, Kochs künstlich Gletscher, die Arbeit bei plastischer Deformation, das Eindringen vo Geschossen in Lehm, das Durchschießen von Panzerplatten u. s. w.

85. Gleitflächen. Denkt man sich einen Körper, welcher in eine Presse ein gespannt ist, längs irgend einer Ebene durchschnitten, so suchen die beiden Teile im allgemeinen übereinander zu gleiten mit einer Kraft, die abhängig ist von der Rich tung der Ebene. Am größten wird dieselbe für eine Ebene, die unter 45° geneig ist, es kann daher vorkommen, wenn der Körper nicht ganz gleichmäßig beschaffen ist, daß derselbe beim Anziehen der Presse nicht gleichmäßig deformiert wird, sondern

derart, daß längs einer um 45° gegen die Druckrichtung geneigten Ebene, welche durch die schwächste Stelle hindurchgeht, der eine Teil über den andern hinweggleitet, somit eine Knickung entsteht, wie Fig. 2262 zeigt.

Solche Gleitflächen lassen sich besonders schön an einem mittels einer starken Schraubenpresse (eventuell hydraulischen Presse) zerdrückten Cylinder oder Würfel aus Buchenholz zeigen.

Auf dem Auftreten der Gleitflächen beruht auch, wie die Figur 2263 zeigt, die sägeartige Beschaffenheit eines Drehspans oder Hobelspans.

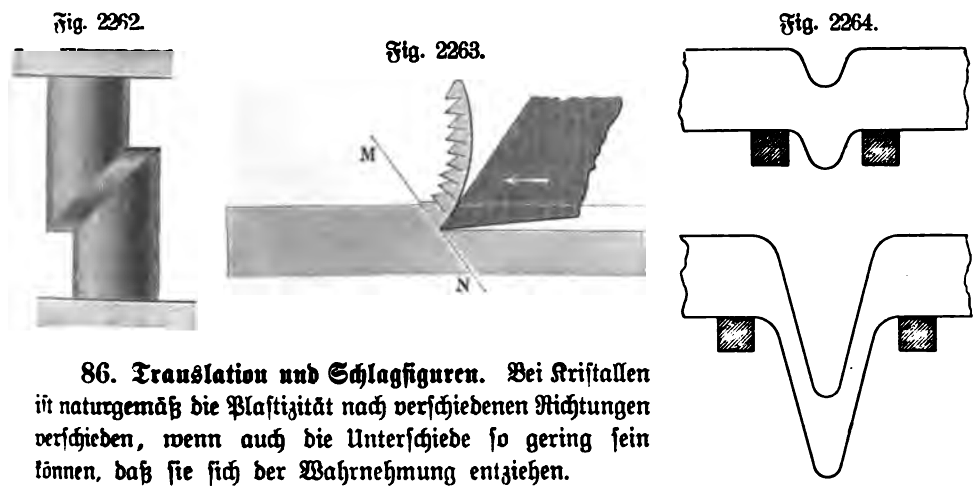


Fig. 2262. Fig. 2263. Fig. 2264.

86. **Translation und Schlagfiguren.** Bei Kristallen ist naturgemäß die Plastizität nach verschiedenen Richtungen verschieden, wenn auch die Unterschiede so gering sein können, daß sie sich der Wahrnehmung entziehen.

Gleitflächen werden also im allgemeinen nicht unter 45° gegen die Druckrichtung auftreten. Nach bestimmten Ebenen findet das Gleiten besonders leicht statt. Dabei verschieben sich die Schichten parallel zu sich selber, so daß die Kristallstruktur, wie man etwa an einem Modell, welches das von den Molekülen gebildete Raumgitter andeutet, demonstrieren kann.

Stumpft man zwei gegenüberliegende Kanten eines Steinsalzwürfels durch Befeilen oder Schleifen ab und preßt denselben senkrecht zu diesen Flächen in einer geeigneten starken Presse (Schraubstock) vorsichtig zusammen, so wird er nach Reusch bleibend in der Richtung der Diagonale verdichtet. Ein Prisma, von den Würfelflächen begrenzt, senkrecht zu dem einen Flächenpaar zusammengepreßt, wird kürzer und dicker durch das Gleiten der Steinsalzteilchen nach den Dodekaederflächen, ohne daß der Zusammenhang des Ganzen gestört wird, falls man nur mit genügender Vorsicht preßt. Ähnliche Deformationen werden erhalten, wenn man eine stumpfe konische Stahlspitze (Körner) auf die Fläche eines Steinsalzwürfels aufsetzt und eintreibt (Schlagfiguren).

Legt man einen Eisstab, dessen optische Achse mit der Längsrichtung zusammenfällt, auf zwei Stützen und darüber in der Mitte eine belastete Schnur, so deformiert er sich, wie Fig. 2264 zeigt (nach Mügge), ohne Änderung seiner Struktur.

87. **Künstliche Zwillinge.** Schleift man an ein Kalkspatrhomboeder, wie es Fig. 2265 im Durchschnitt zeigt, zwei Flächen (die punktierten Linien der Figur) und preßt alsdann den Kristall in der Richtung der Pfeile zusammen, so erfolgt (nach Reusch) an einer oder mehreren Stellen eine Umlagerung der Teilchen, als ob sich dieselben um Gelenke mit Anschlag drehen könnten, d. h. es entsteht eine

Zwillingslamelle (Fig. 2266). Zwischen der Zwillingslamelle und der unveränd Masse ist der Zusammenhang keineswegs gelockert, wie daraus ersichtlich wird, wenn man einen so deformierten Kalkspat in Salzsäure einlegt, die Säure diesen Grenzflächen nicht einzubringen vermag [1]), während sie alle, auch die fein Risse, die sich zufällig im Kristall befinden, sehr rasch erweitert. Nach Bau hauer kann man die künstlichen Zwillinge noch auffallender so erhalten: legt ein prismatisches Spaltungsstück von Kalkspat mit einer stumpfen Kante den Tisch, setzt auf die parallele obere Kante ein Messer senkrecht zur Kante und drückt dieses langsam ein. Es entsteht dann eine Verschiebung (Fig. 22 eines Teils der Kristallmasse in die Zwillingsstellung, wie sie Fig. 2268 zeig

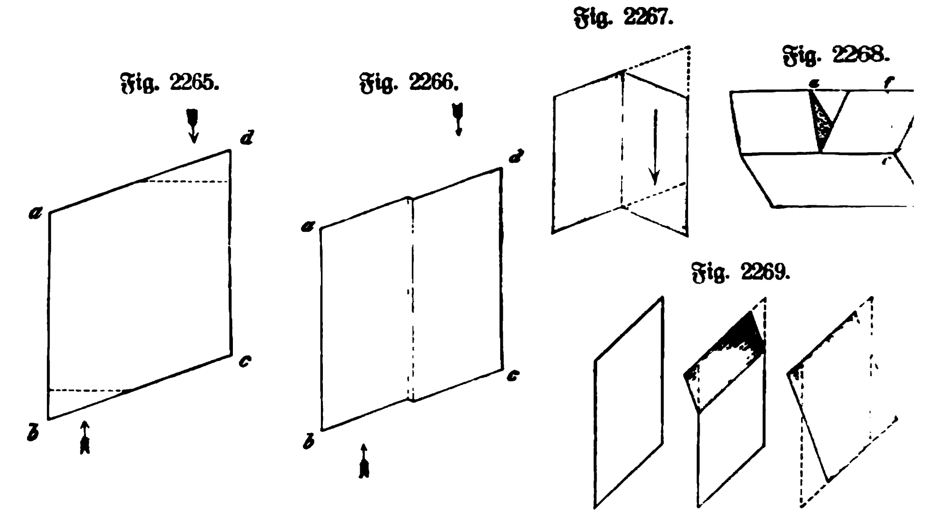


Fig. 2265. Fig. 2266. Fig. 2267. Fig. 2268. Fig. 2269.

88. **Wahre Plastizität von Kristallen.** Bei der Translation und künstlic Zwillingsbildung bleibt die Struktur der Kristalle erhalten, die Eigenschaften si nachher dieselben wie zuvor, insbesondere ist die Anisotropie dieselbe geblieben sind indes auch Deformationen möglich, bei denen die Struktur sicher gestört wi d. h. die Anisotropie ihre Gleichmäßigkeit verliert, die Homogenität der Masse v nichtet wird.

Solche wahre Plastizität wirkt wahrscheinlich mit bei Bewegung der Gletsch wenn sich diese Bewegung auch teilweise erklärt durch Regelation, d. h. Verflüssigu des Eises unter Druck und Wiedererstarren des entstandenen Schmelzwassers, n bei den S. 755 besprochenen Versuchen. Wird bei der S. 753 besprochenen Pre von Spring der Cylinder am Boden etwa mit einer 1 mm-Öffnung versehen u der Hohlraum mit Blei ausgefüllt, so fließt dieses bei einem Druck von et 2000 kg pro Quadratcentimeter aus der Öffnung aus, wobei natürlich die Kristal welche die Masse zusammensetzen, entsprechend deformiert werden müssen. A Kristallen von großer Plastizität setzt sich die gewöhnliche Schmierseife zusamm

89. **Homöotropie.** Kristalle von ölsaurem Ammoniak sind so weich, daß schon durch Strömung der Mutterlauge, in welcher sie schweben, deformiert werd

[1]) Auf Veranlassung von P. Groth führte ich solche Versuche im Jahre 1874 aus.
[2]) Über künstliche Zwillingsbildung bei Natriumnitrat s. Beibl. 27, 1057, 1903.

Verreibt man eine dünne Schicht zwischen zwei Glasplatten, so macht sich ein Bestreben geltend, die regelmäßige Struktur nach und nach wieder herzustellen (Spontane Homöotropie). Man beobachtet ferner während der Deformation ein Bestreben der Masse, solche Anisotropie anzunehmen, daß die ausgezeichneten Richtungen zusammenfallen mit den Zug- und Druckrichtungen (Erzwungene Homöotropie[1]). Zur Demonstration dient das Projektionsmikroskop S. 220.

90. Bildung allotroper Modifikationen durch Schiebung. Derartige Fälle sind anscheinend sehr selten. Als Demonstrationsobjekt eignet sich Protokatechusäure, welche man unter dem Projektionskristallisationsmikroskop aus heißer, mit Phenol versetzter wässeriger Lösung kristallisieren läßt. Da man indes die winzigen mikroskopischen Kristalle nur schwer einer bestimmten Schiebung unterwerfen kann, so kann der Versuch nur zeigen, wie die beiden Modifikationen, von welchen die stabile mit fortschreitender Abkühlung von selbst entsteht (Fig. 2269), aussehen. Näheres findet man in meinem Buche „Flüssige Kristalle“ S. 169.

91. Äußere Reibung. Von der Viskosität oder inneren Reibung unterscheidet sich die äußere Reibung dadurch, daß die beiden aneinander gleitenden Körperteile sich nur in wenigen Punkten berühren. Ihre Größe ist deshalb dem Drucke proportional, da durch das stärkere Aneinanderpressen und die hierdurch bedingte Deformation der Körperteile die Zahl ihrer Berührungspunkte vermehrt wird.

Man kann dieses Gesetz nachweisen, indem man ein langes, gleichmäßig beschaffenes Brett horizontal aufstellt und durch eine über Rollen geführte Schnur mit angehängten Gewichten ein kleineres darauf gesetztes und mit Gewichten belastetes Brettstück zu verschieben sucht. Ich benutze ein durch angeschraubte Latten verstärktes Brett von 4 m Länge und wähle das Gewicht der Wagschale so, daß dadurch die durch das Eigengewicht des Brettstückes bedingte Reibung gerade kompensiert wird. Bei Belastung mit 1, 2, 3, 4 kg ergeben sich die Reibungskräfte bezw. = 0,25; 0,5; 0,75; 1 kg; somit ist der Reibungskoeffizient = 0,25.

Durch Benutzung verschieden großer Brettstücke kann man die Unabhängigkeit der Reibung von der Fläche nachweisen, die sich dadurch erklärt, daß z. B bei Verdoppelung der Fläche auf jede Hälfte nur der halbe Druck wirkt, somit die Zahl der Berührungspunkte ebenfalls sich auf die Hälfte vermindert und für beide Flächen zusammen den früheren Betrag erreicht.

Ferner kann man demonstrieren, daß bei Holz die Reibung verschieden groß ist, je nachdem die Fasern parallel oder zueinander senkrecht sind. Da der Übergang aus Ruhe in Bewegung namentlich bei Holz auf Holz schwerer erfolgt, als der Reibungswiderstand allein bedingen würde, so muß man nach jeder Gewichtszulage durch einen leichten Fingerdruck Bewegung hervorzubringen suchen, die dann gleichförmig vor sich gehen soll.

Zu erwähnen wäre noch die Verminderung der Reibung durch Talk, Talg, Graphit u. s. w., die Reibung beim Gebrauch von Bleistiften, Schreiben mit Aluminium auf Glas u. s. w.

Einen käuflichen Apparat zeigt Fig. 2270 Lb, 50.

Kleiber (Z. 17, 143, 1904) verwendet die von ihm konstruierte Federwage nach Anleitung von Fig. 2271. Ähnlich Kellermann (a. a. O. 161).

[1] Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann, S. 21, 35 u. 36.

Stellt man das Brett schief (Fig. 2272 a), so ist der Winkel φ, bei welchem der Körper zu gleiten beginnt, der Reibungswinkel, seine Tangente der Reibungskoeffizient η. Es ist nämlich die Reibung $R = \eta . N = \eta . Q . \cos\varphi$ und $R = P = Q . \sin\varphi$, somit $\eta . Q . \cos\varphi = Q . \sin\varphi$ und $\eta = tg\,\varphi$. Dasselbe kann man mit jedem Modell der schiefen Ebene zeigen, indem man einen gleitenden Körper aufsetzt.

Hieran schließt sich die Demonstration des Böschungswinkels bei Sandhaufen (Fig. 2272 b), der eigentümlichen Erscheinungen beim Ausfließen von Sand und Lehm (Versuche von Forchheimer) und das merkwürdige Verhalten eines mit nassem oder trockenem Sand gefüllten Kautschukbeutels (Reynolds).

Fig. 2270.



Fig. 2272 a.

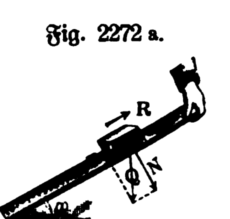


Fig. 2271.

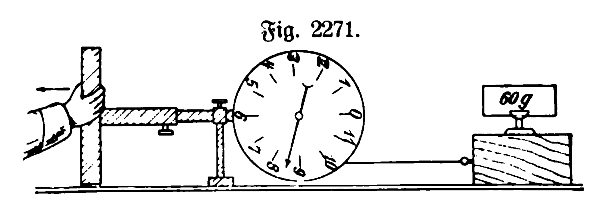


Fig. 2272 b.



Beispiele von Reibungskoeffizienten sind:

Eisen auf Eisen	0,277
Eisen auf Messing	0,263
Eisen auf Kupfer	0,170
Eichen auf Eichen[1]	0,418 = 2,273 +
Eichen auf Kiefern	0,667
Kiefern auf Kiefern	0,562

92. Seilreibung, Stabsysteme mit Reibung. Zur Demonstration der Seilreibung kann man auf ein Stativ einen halbcylindrischen Kloß legen und darüber ein Band hängen, welches an beiden Enden durch gleiche Gewichte belastet ist. Es ist ein erhebliches Übergewicht auf einer Seite erforderlich, um eine Verschiebung des Bandes zu bewirken, und dieses gibt direkt ein Maß der Reibung.

Man kann ferner demonstrieren: das Bremsen eines belasteten Seiles durch Umwickeln um eine Stange, die Übertragung der Bewegung von einem Spill auf ein Seil und den Einfluß der Reibung auf das Gleichgewicht bei Flaschenzügen.

Grimsehl (Z. 16, 66, 1903) empfiehlt die Verwendung von Porzellanringen statt Rollen oder einer Vorrichtung, wie sie Fig. 2273 zeigt, welche den Schließ-

[1]) Bei Hölzern ist es nicht gleichgültig, wie die Fasern laufen; die Reibung ist nämlich bei gekreuzten Fasern (+) viel geringer als bei parallelen (=).

vorrichtungen bei Kleidungsstücken nachgebildet ist und auch das Prinzip des Nähens erklärt.

Weitere Beispiele der Bedeutung der Reibung für die Technik sind die Befestigung durch Nägel und durch Schrauben. Man kann insbesondere bei einem der früher behandelten Schraubenmodelle den Einfluß der Reibung nachweisen.

Von besonderem Interesse ist das Gleichgewicht bei Stabsystemen.

Als Beispiele empfehlen sich das Gleichgewicht einer an eine Mauer gelehnten Leiter (Fig. 2274) und die Steigeisen zur Besteigung von Telegraphenstangen (Fig. 2275). Man sucht zunächst die Auflagedrucke und die Reibungskräfte nach dem Parallelogrammgesetz, verlegt die Angriffspunkte der Resultierenden an den Schnittpunkt ihrer Richtungen und untersucht, ob die sich hier ergebende Resultante imstande ist, die vorhandene Kraft zu kompensieren.

Behn (Z. **16**, 130, 1903) macht auf einen Versuch von Warburg über Kanten und Gleiten aufmerksam. Ein Klotz wird wie bei den Versuchen über

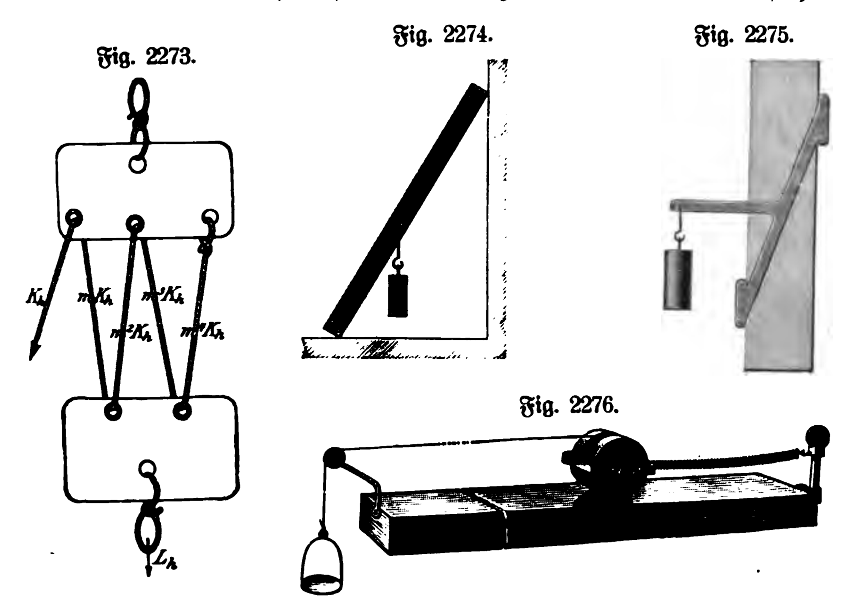


Fig. 2273. Fig. 2274. Fig. 2275. Fig. 2276.

Standfestigkeit durch eine in der Höhe des Schwerpunktes befestigte Schnur gezogen. Soll er auf der Unterlage gleiten, so muß die Kraft mindestens gleich der Reibung sein. Ob sie aber wirklich Gleiten hervorbringt oder Drehung um die Kante und damit Umkippen des Klotzes, hängt davon ab, wie groß ihr Moment im Verhältnis zu dem der Schwere ist. Man kann es leicht so einrichten, daß der Klotz auf dem Tisch stetig fortgezogen wird, bis er einen Kreidestrich erreicht. Diesen vermag er infolge der größeren Reibung nicht zu überschreiten, sondern kippt um.

93. **Zugkraft.** Paalzow und Neesen benutzen den in Fig. 2276 dargestellten Apparat zur Demonstration der Abhängigkeit der Zugkraft einer Lokomotive von der Reibung der Räder auf den Schienen. Sobald die Spiralfeder hinreichend angespannt ist, bewirkt weiteres Auflegen von Gewichten auf die Wagschale nur Drehung der Walze um ihre Achse entgegen der Reibung.

Hierher gehört auch der bergan laufende Cylinder, welchen man sich aus

einer runden Pappschachtel, in welche man innen am Rande ein Bleistück ankittet, leicht selbst herstellen kann.

Daß eine auf der schiefen Ebene hinauffahrende Lokomotive bei ungenügender Reibung sich rückwärts bewegen kann, zeigt der Versuch von **Kommerell**, Fig. 2277. An eine gewöhnliche Fadenspule befestigt man ein Band, welches einige Male um dieselbe aufgewickelt wird. Es ist gut, wenn es etwas lang ist, um durch das Aufwickeln von mehr oder weniger desselben den Durchmesser der Spule ändern zu können. Man legt die Spule, wie die Figur zeigt, auf eine schiefe Ebene. Hält man das Ende des Bandes fest, so wird, wenn die Ebene zu schief oder das Band zu dick aufgewickelt ist, die Spule sich über die Ebene halb rutschend, halb rollend herabbewegen. Ist die Ebene weniger schief oder weniger Band aufgewickelt, so bleibt die Spule stehen, und man kann bei noch günstigeren Verhältnissen durch Zug an dem Bande die Spule zum Aufwärtslaufen bringen, wobei sich das Band aufrollt.

Fig. 2277.

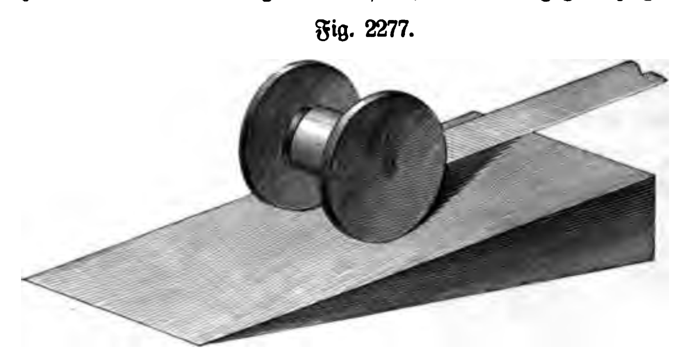


Fig. 2278.



Einen komplizierteren Apparat zu Versuchen über Reibung und Zugkraft einer Lokomotive beschreibt **Hartl** (Z. 9, 217, 1896).

Die Einrichtung ist aus Fig. 2278 ersichtlich. Das die Lokomotive vorstellende Wägelchen *T* wird in Bewegung gesetzt durch eine über eine Trommel gewickelte und mit Gewichten belastete Schnur, und die von ihm ausgeübte Zugkraft wird gemessen durch die Federwage *D*, welche ihre Angabe selbsttätig auf der Scheibe *S* aufzeichnet. Belastet man die Schnur immer mehr, so kommt man schließlich zu einer maximalen Zugkraft, indem die Triebräder auf der Stelle rotieren, da die Reibung nicht mehr ausreicht, die Federwage noch stärker anzuspannen [1]).

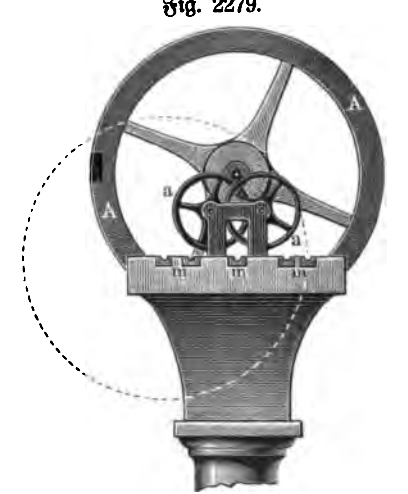
[1]) Der Apparat kann auch zur Messung der Zugspannung bei beschleunigter Bewegung gebraucht werden und ist zu beziehen zu 110 Mk. von Feinmechaniker **F. Antusch** in Reichenberg, Deutsch-Böhmen.

94. Reibung der Bewegung. Die Reibung der Ruhe entspricht der Elastizitätsgrenze und würde genau dieser gleich sein, wenn sich die Körper an allen Punkten der Kontaktfläche wirklich (ohne Dazwischentreten von Luft, Oxyd, Fett u. s. w.) berühren würden.

Die Reibung der Bewegung entspricht der Summe der Elastizitätsgrenze und der inneren Reibung, welche letztere von der Geschwindigkeit abhängt und mit dieser verschwindet. Tatsächlich ist sie kleiner als die Reibung der Ruhe und unabhängig von der Geschwindigkeit und der Größe der Berührungsfläche, weil durch die Erschütterungen die Zahl der Berührungspunkte vermindert wird. Besonders klein wird sie beim Dazwischentreten einer fremden Substanz mit geringer innerer Reibung, wie Graphit oder Talk, oder von Fett, wie Talg, Wagenschmiere u. s. w. Sehr hohen Wert nimmt sie an beim sogenannten „Fressen“, wobei die Zwischenschicht durch die Bewegung beseitigt und durch Abreiben der Hervorragungen die Zahl der Berührungspunkte vergrößert wird, so daß an einzelnen Punkten Zusammenwachsen, Wiederauseinanderreißen u. s. w. erfolgt.

Zur Messung der Abhängigkeit der gleitenden Reibung von der Geschwindigkeit dient entweder der Apparat Fig. 2270 oder die schiefe Ebene. Ist wie gewöhnlich die Reibung unabhängig von der Geschwindigkeit, so wird eine Beschleunigung erzielt, welche der Differenz der treibenden Kraft und der Reibung entspricht und in gleicher Weise wie bei der Fallrinne gemessen werden kann. Wächst die Reibung mit der Geschwindigkeit, wie z. B. bei einem von Pferden gezogenen Schlitten, so wird schließlich die Differenz gleich Null, der Schlitten bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter. (Ebenso ein Eisenbahnzug, wobei allerdings rollende Reibung in Betracht kommt.) Über die Ausführung der Versuche siehe § 91, S. 761.

Fig. 2279.



95. Tribometer. Um die Verschiedenheit der Reibung bei verschiedenen Unterlagen nachzuweisen, kann der in Fig. 2279 abgebildete Apparat dienen; er ist aus dem Musschenbroekschen und Nolletschen Tribometer zusammengesetzt. Über das aus mit heißem Öl getränktem Holz oder aus Messing gefertigte Rad *AA* wird ein Band gelegt, welches auf beiden Seiten kleine Wagschalen trägt; in diese wird ein beliebiges, die Tragkraft des Apparates nicht übersteigendes, aber doch ansehnliches Gewicht gelegt, und man versucht nun durch einerseits aufgelegtes Übergewicht Drehung hervorzubringen. Hierbei legt man nacheinander die wohl abgedrehte eiserne Achse des Rades auf die Friktionsrollen *aa* und in die Zapfenlager *mm*... Jedes Paar dieser Lager besteht aus einem anderen Material, aus Eisen, Messing, Kanonenmetall, Zink, Holz u. dergl., und alle sind gleich gebohrt und gleich sorgfältig poliert. Der Versuch kann dabei mit und ohne Fett angestellt werden.

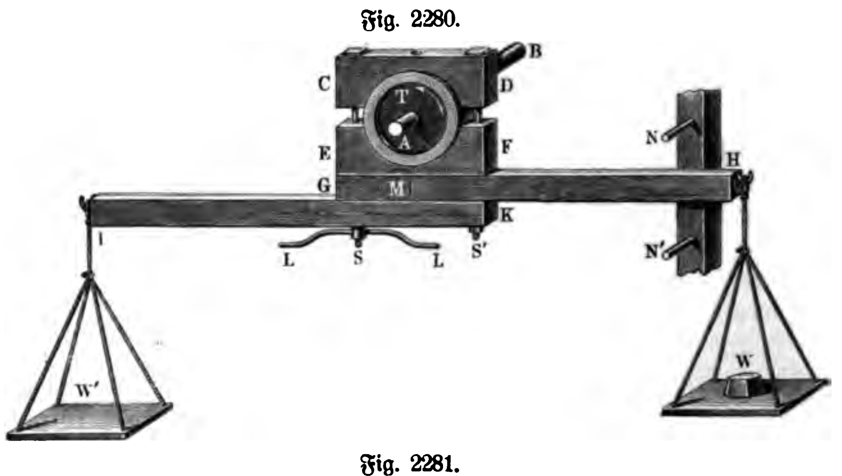
Ferner kann man durch Vergrößerung des Übergewichts die Reibung der Ruhe in Reibung der Bewegung übergehen lassen, eventuell auch einfach durch Anstoßen.

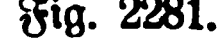
Von verschiedenen Mechanikern werden übrigens auf gleichem Prinzip beruhende besondere Apparate (Coulombs Tribometer) geliefert (E, 30; W, 25).

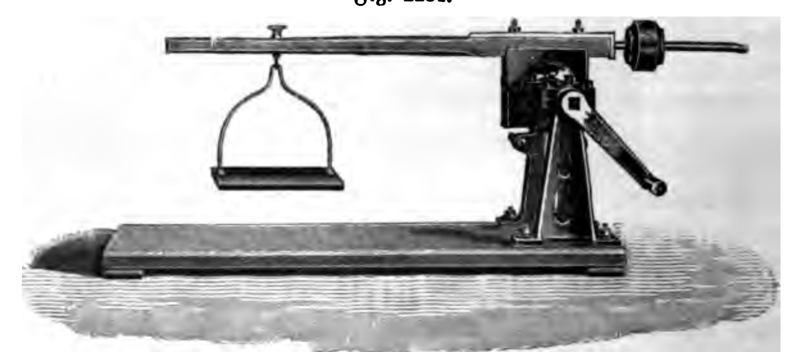
Bei einer einfachen Konstruktion ist an eine rotierende Welle eine Art Pendel angehängt, welches bei bestimmter Tourenzahl um so weiter mitgenommen wird, je größer die Reibung.

96. Die Dynamometer. Das bekannteste darunter ist der Pronysche Zaum (Fig. 2280). Die sich drehende Achse wird zwischen Bremsbacken eingeklemmt, deren eine mit einem langen Fortsatz rechtwinklig zur Achse versehen ist, an welchen man Gewichte anhängen kann. Wählt man diese so, daß der Fortsatz eben stehen bleibt

Fig. 2280.




Fig. 2281.



und nicht mitgenommen wird, so ist die Reibung nach dem Hebelgesetz gleich dem Gewicht mal Verhältnis von Fortsatz zu Wellenradius.

Die Fig. 2281, 2282 und 2283 zeigen Formen dieses Bremsdynamometers für Demonstrationszwecke, wie sie von Leybolds Nachf. in Köln geliefert werden. Die zweite wird auf die Schwungmaschine aufgesetzt, und zwar bleibt die Achse stehen, während die konische Bremsvorrichtung umläuft. Ein Tourenzähler ermöglicht die Bestimmung der Geschwindigkeit. Bei Fig. 2283 dient eine Federwage zur Messung der Kraft und ein Elektromotor zur Umdrehung.

Einfacher als die Backenbremse ist die Bandbremse, welche man sich durch einen über die Welle gelegten, an den Enden mit Gewichten belasteten Riemen leicht selbst herstellen kann (Fig. 2284).

Sie bietet den Vorteil, daß der Druck der reibenden Flächen aneinander durch die angehängten Gewichte direkt bestimmt werden kann. Ist derselbe beträchtlich und auch die Geschwindigkeit groß, so tritt Erhitzung ein. Man versieht dann die Reibfläche des Riemens mit Holzklötzchen oder verwendet ein Stahlband. Durch angenietete hakenförmige Vorsprünge wird dafür gesorgt, daß es von der Riemenscheibe nicht abgleiten kann. Zweckmäßig verwendet man zur Bestimmung der Kraft eine Federwage. Unter die Wagschalen werden Stative gesetzt, so daß der Riemen nur geringen Spielraum hat. (Man kann hier ferner auf die Verwendung der Bremse als Wagenbremse hinweisen.)

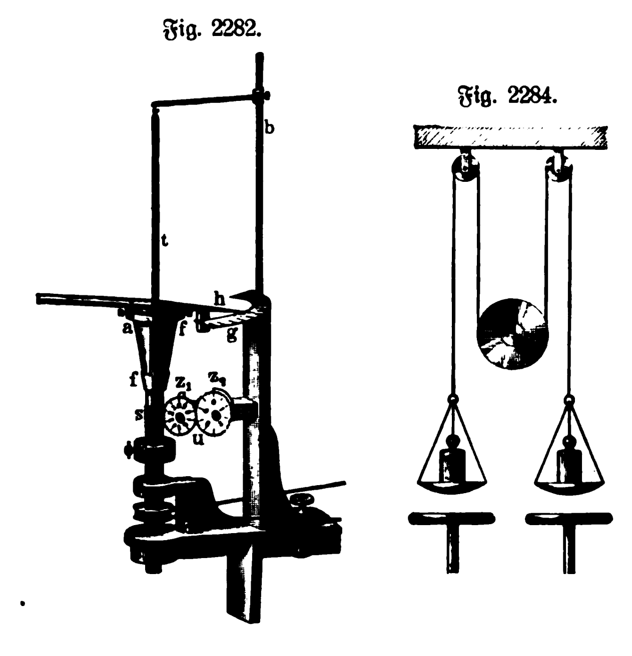
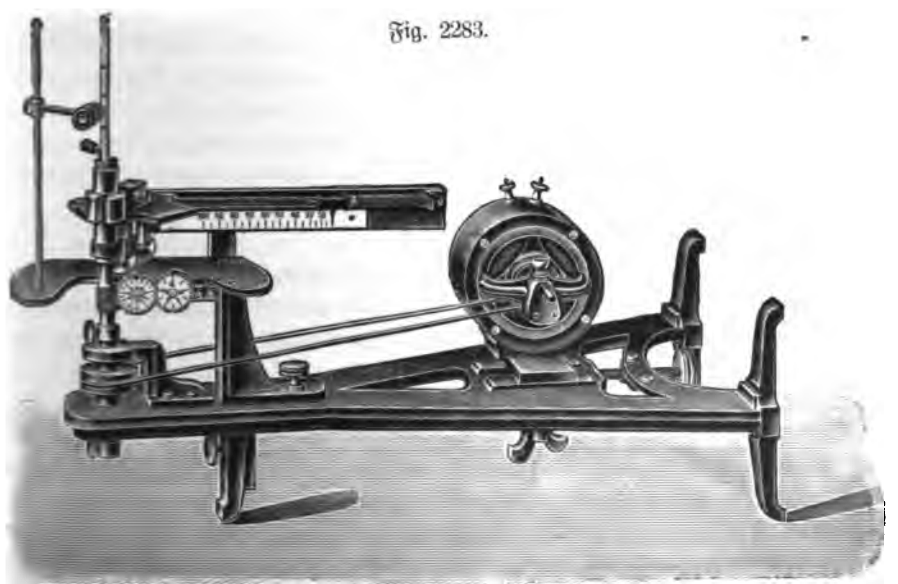


Fig. 2282.

Fig. 2284.


Fig. 2283.

97. Arbeit der plastischen Deformation. Als Beispiel kann etwa das Eindringen eines mit Gewichten belasteten Stabes in weichen Lehm, der in einer Kiste enthalten ist, gezeigt werden. Die Tiefe des Eindringens entspricht einigermaßen der Fallhöhe. Ein besonders auffallendes Beispiel ist das Eindringen von Geschossen in Hindernisse, z. B. Panzerplatten. Die Frage, was aus der geleisteten Arbeit, d. h. der verlorenen Energie, wird, kann erst später beantwortet werden.

98. Homogene und inhomogene Körper. Stäbchen aus demselben Brett in derselben Richtung geschnitten zeigen nicht immer dieselbe Elastiziät, Reibung u. s. w. (z. B. kleinere, wenn näher der Mitte, größere, wenn näher dem Umfang des Baumstammes ausgeschnitten). Holz ist deshalb ein inhomogener Körper. Kristalle sind im allgemeinen homogene anisotrope Körper [1]).

Ein besonderer Fall der Inhomogenität ist der, daß ein Körper aus zwei Stoffen verschiedener Art zusammengesetzt ist. Das Verhalten solcher kann wesentlich abweichen von demjenigen einfacher Körper. Denkt man sich z. B. die Poren eines Schwammes aus vollkommen elastischen Fasern mit einer Substanz von verschwindend kleiner Elastizitätsgrenze, z. B. Marineleim, ausgefüllt, so wird sich sowohl bei der Dehnung dieses Schwammes wie auch beim Zurückkehren zur ursprünglichen Form die innere Reibung des Marineleims geltend machen und insbesondere einen Verbrauch an Arbeit bedingen.

Wäre die Elastizitätsgrenze des Marineleims tatsächlich = 0, so würde sich nichtsdestoweniger der Körper wie ein vollkommen elastischer verhalten, d. h. er würde nach und nach vollkommen die frühere Form wieder annehmen.

99. Elastische Nachwirkung. Schon beim Dehnen eines Kautschukschlauchs durch ein angehängtes Gewicht tritt dieselbe deutlich hervor. Es dauert einige Zeit, bis die endgültige Verlängerung eingetreten ist, und nach Beseitigung des Zuges kehrt das Ende nur allmählich vollkommen auf den Nullpunkt zurück. Besonders auffallend läßt sich die Erscheinung beim Auf- oder Zudrehen einer starken Spiralfeder aus Guttapercha zeigen, die man sich aus in heißem Wasser erwärmter käuflicher Guttapercha leicht selbst herstellen kann. Um die langsam fortschreitende Bewegung des Endes auch aus der Ferne deutlich verfolgen zu können, empfiehlt es sich, daran einen Zeiger mit hellroter Spitze anzubringen. Ein Bild über das Zustandekommen der Erscheinung könnte man sich in der Art machen, daß man annimmt, einzelne Moleküle könnten zwischen den andern wandern, ähnlich wie der Marineleim in den Poren des zuvor (§ 98) betrachteten Schwammes.

100. Relaxationszeit und Hysteresis. Zieht man bei dem S. 757 erwähnten mit Marineleim gefüllten Torsionsapparat kräftig an der Schnur, in welche ein Dynamometer eingeschaltet sei, und stellt dieselbe dann fest, so verschwindet allmählich die am Dynamometer abzulesende Spannung. Relaxationszeit ist die Zeit, bis sie auf den e^{ten} ($2{,}71828^{ten}$) Teil des Anfangswertes gesunken ist.

Denkt man sich in eine größere Masse Marineleim eine gespannte Spiralfeder eingeklemmt, so wird die Spannung derselben ebenso nach und nach abnehmen. Man hätte den Fall einer nach und nach verschwindenden „inneren Spannung".

Belastet man einen elastischen Körper (etwa einen gespannten Riemen) vom Zug 0 beginnend allmählich bis zu einem Maximum und entlastet ihn dann wieder ebenso allmählich, so ergeben sich infolge der elastischen Nachwirkung die Längen, welche einem bestimmten Gewichte in beiden Fällen entsprechen, verschieden groß, und zwar ist die beim Spannen des Körpers verbrauchte Arbeit größer als die

[1]) Das eigentliche Charakteristikum eines Kristalls ist seine Fähigkeit zu „wachsen" in Lösungen, beim Erstarren, bei enantiotroper oder monotroper Umwandlung oder bei Sublimation. Weder Homogenität, noch Anisotropie gehören streng genommen zum Begriff eines Kristalls.

beim Entspannen zurückgewonnene. Die Erscheinung ist ganz analog den Arbeitsverlusten, welche bei einfachen Maschinen durch die Reibung veranlaßt werden. Man betrachtet deshalb als Ursache eine Art innerer Reibung, d. h. Reibung zwischen den Molekülen des Körpers (vergl. S. 768). Da sich die Energie dabei in Wärme umsetzt (obschon die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird), gehört die nähere Erörterung in das Kapitel der Entstehung von Wärme durch Reibung (Elastische Hysteresis).

101. Unvollkommene Elastizität. Die Erscheinungen, welche sich nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze zeigen, sind nicht viel verschieden von denjenigen, die man beobachtet, solange man sich in den Grenzen der vollkommenen Elastizität hält. Der Unterschied besteht lediglich darin, daß die Deformationen beim Nachlassen der Kraft nicht mehr vollständig rückgängig werden. Ist die Überschreitung der Elastizitätsgrenze nur klein und die Dauer der Deformation nur kurz, so ist ein Unterschied kaum wahrnehmbar.

Aus weichem Brot kann man durch Kneten die verschiedenartigsten Figuren herstellen. Formt man so zunächst eine Kugel und knetet sie weiter derart, daß sechs Zapfen aus derselben heraustreten, also ein plumpes rechtwinkliges Achsenkreuz entsteht, so kann man den so erhaltenen Körper mit aller Kraft gegen den Tisch oder die Wand werfen, ohne daß er eine Veränderung erleidet, da die Dauer der beim Stoße auftretenden Kraft zu kurz ist, als daß ein merkliches Fließen des Teiges stattfinden könnte. Durch eine viel kleinere dauernd wirkende Kraft wird er dagegen deformiert wie ein weicher unelastischer Körper.

102. Plastizitätsgrenze, Festigkeit, Kohäsion. Steigt die Spannung an einem Punkte eines gepreßten oder gezogenen Körpers über die Elastizitätsgrenze hinaus immer höher, so entsteht schließlich bei Erreichung eines bestimmten Grenzwertes der Kraft pro Flächeneinheit, der Plastizitätsgrenze, Festigkeit oder Kohäsion, da, wo eine Zugspannung auftritt, ein Riß. Maßgebend dafür ist natürlich nicht wie bei der Elastizitätsgrenze die tangentiale Komponente der Kraft (Schubkraft), sondern die (zum Riß) normale Komponente (Zugkraft). Der einfachste Fall ist der der Dehnung eines Drahtes oder Stabes, da hier für eine Fläche senkrecht zur Längsrichtung die ganze Kraft zugleich die normale Kraft ist, welche hinsichtlich der Plastizitätsgrenze in Betracht kommt. Für eine schräge Fläche wäre diese Normalkomponente kleiner, es muß also der Riß, wenn er erfolgt, notwendig in einem Querschnitt senkrecht zur Längsrichtung sich vollziehen.

Bei Bestimmung der Festigkeit muß in der Regel darauf Rücksicht genommen werden, daß sich durch die plastische Deformation der Querschnitt erheblich ändert; es muß somit bei der Berechnung der im Momente des Durchreißens vorhandene Querschnitt in Betracht gezogen werden, nicht der ursprünglich vorhandene.

Zur Messung der Festigkeit von Drähten benutze ich einen Eisendraht von 1,4 mm Durchmesser. Derselbe wird ebenso wie der beim Nachweis der Plastizität benutzte Bleidraht mit der Winde aufgezogen, sodann eine Wagschale angehängt, der Bohrmaschinentisch darunter geschoben, ein Gewicht von 40 kg aufgelegt und nun der Tisch heruntergeschraubt. Sodann wird der Versuch mit 42 kg Belastung, wobei Zerreißen eintritt, wiederholt. Um Verletzungen durch das herunterfallende Drahtende vorzubeugen, wird der Draht mit einer weiten Drahtspirale umgeben. Die Festigkeit ist:

$$\text{a) Technisch} = \frac{42}{3{,}14 \,.\, 0{,}52^2 \,.\, 10^{-6}} = 49 \,.\, 10^6 \,\frac{\text{kg}}{\text{qm}} \left(= 49 \,\frac{\text{kg}}{\text{qmm}}\right);$$

$$\text{b) Absolut} = 49 \,.\, 9{,}81 \,.\, 10^7 \,\frac{\text{Dynen}}{\text{qcm}}.$$

Apparate zur Prüfung der Festigkeit von Materialien, d. h. Dynamometer mit passenden Einspannvorrichtungen sowie Sicherungen, welche Beschädigung durch das plötzliche Zurückschnellen beim Zerreißen des Probestückes verhindern, zeigen die Fig. 2285 und 2286[1]).

Fig. 2285.

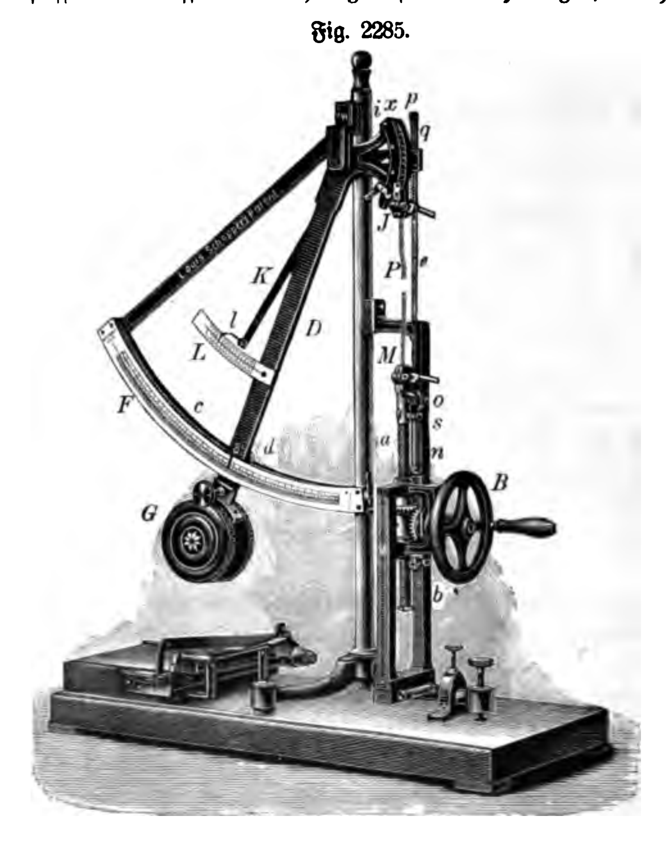
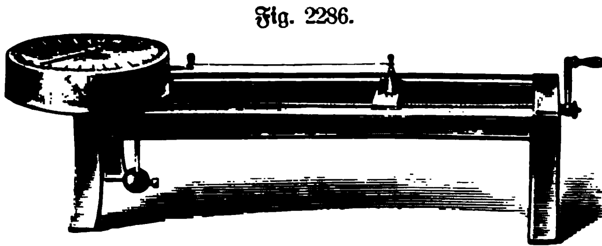


Fig. 2286.



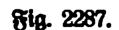
Man kann hinweisen auf die Bedeutung der Bestimmung der Zugfestigkeit von Stäben, der Tragkraft von Balken und Säulen, der Drehungsfestigkeit von Wellen, der Spannfestigkeit von Bolzen, Panzerplatten, Zerschneiden von Seife mit Draht u. s. w. Ferner kann man die Wirkung verschiedener Scheren für Blech, Draht, Rund- und Flacheisen u. s. w. demonstrieren.

Bei letzteren sollte im Prinzip kein Bruch erfolgen, sondern lediglich ein Abschieben des einen Teils vom andern durch plastische Deformation, und tatsächlich tritt dies auch ein, wenn durch einen gleichzeitig ausgeübten allseitigen Druck das Auftreten von Zugspannungen verhindert wird. Unter gewöhnlichen Umständen ist dies nicht möglich, es treten daher Risse auf, welche z. B. beim Durchstanzen runder Löcher in Eisenplatten eine sägeartige Beschaffenheit der Oberfläche des ausgestanzten Kernes bedingen und entsprechende Rauhigkeit der inneren Wandung der Öffnung.

[1]) Ersterer dient zur Ermittelung der Festigkeit von Papier und ist zu beziehen von L. Schopper, Leipzig, Arndtstr. 27, letzterer zur Prüfung von Seidenfäden, Garnen u. s. w., zu beziehen von Leppin u. Masche, Berlin SO., Engelufer 17 (Preis 136 Mk.). Die Apparate Fig. 2287 und 2288 sind zu beziehen von Franz Hugershoff,

Allgemein werden bei jeder Deformation eines Körpers im Innern eines Körpers Zugspannungen auftreten, welche, wenn man an der betreffenden Stelle eine Schnittebene gelegt denkt, die beiden Teile auseinander zu ziehen trachten. Je nach der Richtung der Schnittebene ist diese normal dazu wirkende Zugkraft verschieden groß. Für eine Richtung ist sie ein Maximum, und diese gibt deshalb die Richtung des auftretenden Risses an, falls die Zugkraft die Kohäsion übersteigt.

Hier wäre hinzuweisen auf das Entstehen eines Risses beim Schneiden von Glas mit Diamant oder Stahlrädchen, auf den Gebrauch der Mohsschen Härteskala, die Härtebestimmung nach Hertz, die Zertrümmerung eines Glasstabes durch Aufwickeln von gespanntem Draht, das Entstehen pyramidaler Bruchstücke beim Zerquetschen eines Steinwürfels in einer Festigkeitsmaschine[1]) u. s. w.


Fig. 2287.

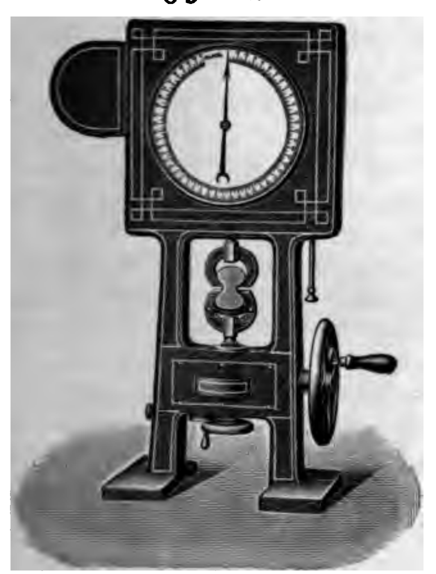


Fig. 2288.



Beispiele der Werte des Festigkeitsmodulus in kg pro qmm sind[2]):

Bleidraht	2,7	Kupferdraht	27,8
Hanfseil	4,5	Messingdraht	35,5
Tannenholz	7,5	Eisendraht	41,8
Eichenholz	12,7	Stahldraht	102,0

Um die Festigkeit einer Holzlatte zu bestimmen, benutze ich eine solche von 1900 mm Länge, 24 mm Breite und 10 mm Dicke, welche hochkant auf zwei

Leipzig, zu bezw. 650 und 375 bis 2200 Mk. Der erste dient zur Prüfung der Zugfestigkeit von Zementproben, der zweite für Zugfestigkeit. Ein ähnlicher für Torsionsfestigkeit von Drähten und Stäben kostet 575 Mk. Andere Bezugsquellen von Zerreißapparaten sind: C. Cramer, Chemiker, Berlin NW., Kruppstraße 6; Osc. Leuner, Mech. Institut, Dresden, Techn. Hochschule; L. Schopper, Fabrik wissenschaftlicher Instrumente, Leipzig, Arndtstr. 27.

[1]) Zu beziehen von Mohr u. Federhaff, Maschinenfabrik in Mannheim. — [2]) Auch hierbei zeigt sich die Unzweckmäßigkeit des Kilogramms als Krafteinheit. Die Tragfähigkeit eines Materials, welche in Normalkilogrammen pro qmm = 70 gesetzt werden kann, wäre in Karlsruher Einheiten = 69,98, in Petersburger = 69,91, in Madrider = 70,038, also abhängig vom Orte, obschon doch die Zahlen Konstanten des Materials sein sollten.

Schneiden gelegt wird, die von hölzernen Böcken getragen werden. Mittels des Aufzugs (S. 17) wird die Mitte langsam bis zum Brechen belastet. Ist x die gesuchte Festigkeit, so ergibt sich diese Belastung (36,5 kg) nach der Formel:

$$36{,}5 = \frac{2 \cdot x \cdot 10 \cdot 24^2}{1900},$$

woraus folgt $x = 6{,}0$.

Ebenso kann umgekehrt aus der Festigkeit die Bruchbelastung ermittelt werden, wovon später bei der hydraulischen Presse Gebrauch gemacht wird.

103. Sprödigkeit und Dehnbarkeit. Je höher die Grenze der Plastizität liegt und je größer die innere Reibung, um so größer ist die Härte des Körpers[1]). Je geringer die Differenz der Kräfte, bei welchen Plastizitätsgrenze und Elastizitätsgrenze erreicht werden, um so größer ist die Sprödigkeit, um so kleiner die Dehnbarkeit[2]).

Beispiele eines harten dehnbaren und eines harten spröden Körpers sind Eisendraht und Glasfaden; Beispiele entsprechender weicher Körper: Blei und Pech.

Marineleim ist so plastisch, daß man ihn leichter als Wachs mit den Fingern kneten kann; sobald man aber mit einem kleinen Hammer einen raschen Schlag darauf gibt, zerspringt er in zahlreiche Splitter wie sprödes Glas. Ein anprallendes Geschoß aus Blei wird dagegen trotz der Schnelligkeit der Deformation nur in andere Form gedrückt, die Spannungsgrenze wird nicht erreicht.

Da sich die Elastizitätsgrenze auf die tangentiale Kraftkomponente (Schubkraft), die Plastizitätsgrenze auf die normale Komponente (Zugkraft) bezieht[3]), deren Verhältnis von der Art der Deformation abhängt, so ist auch die Sprödigkeit davon abhängig, somit keine Konstante des Materials. Aus diesem Grunde unterscheidet man z. B.: Dehnbarkeit (Tenazität), Ziehbarkeit (Duktilität), Hämmerbarkeit, Biegsamkeit, Geschmeidigkeit. Auch die Härte läßt sich nicht genau bestimmen (Härteskala der Mineralogen).

Die seitliche Kontraktion bei sehr dehnbaren Körpern beeinträchtigt die Genauigkeit der Messungen und kann diese geradezu hindern, falls es nicht möglich ist, die raschen Änderungen des Querschnittes bei steigender Kraftwirkung messend festzustellen.

Die Festigkeitslehre bildet die Grundlage des gesamten Bauwesens, mag sich dasselbe auf Hochbau (Bau von Häusern) oder Tiefbau (Kanalisation) oder Maschinenbau u. s. w. erstrecken, sowie der mannigfaltigsten technischen Arbeiten, wie schneiden, abmeißeln, schnitzen, stemmen, gravieren, ciselieren, hobeln, drehen, bohren, Schraubenschneiden, sägen, raspeln, feilen, schaben, schleifen, abscheren, durchstanzen, spalten, mahlen, zerstampfen u. s. w. Die hierzu dienlichen Werkzeuge müssen so geformt sein und derart gehandhabt werden, daß an der gewünschten Stelle die Kohäsion des Materials in beabsichtigter Richtung überwunden wird[4]).

[1]) Von besonderem Interesse ist, daß durch eine rasch rotierende, mit Diamantstaub versehene Scheibe Diamant selbst geschliffen werden kann. — [2]) Da im einen Fall die normale, im andern die tangentiale Komponente in Betracht kommt, deren Verhältnis von der Art der Deformation abhängt, kann sich ein und derselbe Stoff bei verschiedenartiger Deformation als spröder oder dehnbarer Körper verhalten (vergl. S. 769). — [3]) Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, S. 102. — [4]) Beim Schleifen wirken lose Schmirgelpartikelchen absprengend, beim Polieren auf Pech u. s. w. befestigte deformierend nach Art eines Polierstahls (siehe a. S. 508).

104. Einfluß innerer Spannungen. Denkt man sich in das Innere eines Körpers, etwa einer Harzmasse, eine zusammengedrückte Spiralfeder eingeschlossen und versucht nun die Festigkeit zu bestimmen, so wird man natürlich in der Richtung des von der Feder ausgeübten Druckes eine wesentlich kleinere Festigkeit finden als in der Richtung senkrecht dazu, weil die innere Spannung sich zu dem äußeren Zuge addiert. Bei manchen Körpern, z. B. Gußeisenteilen, sind solche innere Spannungen, infolge ungleicher Abkühlung bei der Herstellung, vorhanden. Besonders auffallend zeigt sich das anomale Verhalten solcher Körper mit eigenen inneren Spannungen bei Glastränen und Bologneser Fläschchen. Erstere (Fig. 2289) faßt man leicht mit einer kräftigen Rundzange am spitzen Ende, hält sie zum Schutz gegen fortfliegende Splitter in ein leeres großes Becherglas und drückt nun die Zange stark zu.

Will man das Zerspringen nicht direkt zeigen, so wickelt man dieselben in ein Papier und bricht ihnen dann die Spitze hinten ab; all der feine Sand, in welchen sie zerspringen, bleibt dann im Papier. Beim Zerspringen in der Luft könnte durch die Splitter jemand beschädigt werden. Beim Zerspringen in einem Trinkglase voll Wasser wird das Glas durch die vereinigte Gewalt, mit der die Splitter auseinanderfahren, meistens zerbrochen.

Fig. 2289. Fig. 2290.

Die Bologneser Fläschchen, Fig. 2290, bestehen aus nicht verkühltem Glase und springen, wenn man einen Splitter von einem Feuerstein hineinfallen läßt, oder denselben etwas darin herumrüttelt. Man kann das Zerspingen etwa vergleichen dem Abschießen einer gespannten Armbrust. (Auch das Aufreißen von Metallpatronenhülsen beim Lagern, sowie die langsamen Veränderungen mancher Körper durch schwache Kräfte bei säkularen Versuchen gehören vielleicht hierher.)

105. Spaltbarkeit und Schlagfiguren. Bei anisotropen Körpern ist die Plastizitätsgrenze für verschiedene Richtungen verschieden, die Risse treten daher im allgemeinen in bestimmten Spaltungsebenen leichter ein.

Zur Demonstration eignen sich besonders Steinsalz und Kalkspat. Bei ersterem sind die Spaltungsrichtungen die Würfelflächen, bei letzterem Rhomboederflächen. Man legt einen Kristall auf eine ebene Unterlage (Brett, dicke Kautschukplatte), setzt ein Messer in der Richtung der herzustellenden Spaltungsebene auf und führt auf dasselbe mittels Hammers einen raschen Schlag. Es spaltet dann ein Stück mit fast vollkommen ebener Bruchfläche ab. Glimmer läßt sich schon einfach durch Einschieben des Messers mit der Hand in sehr feine ebene Lamellen zerspalten. Zerschlägt man ein Stück Schwerspat oder Bleiglanz in der Hand mittels eines kleinen Hammers, so resultieren ebenfalls regelmäßig begrenzte Bruchstücke.

Schlagfiguren entstehen, wenn man die Kristallplatte auf eine Kautschukunterlage legt, die Spitze eines Körners aufsetzt und mit einem Hammer einen kurzen Schlag auf diesen gibt. Bei Steinsalz entstehen so Sprünge nach der Dodekaederfläche, während unter anderen Umständen das Steinsalz nach den Würfelflächen spaltet.

Nach Kick können auch spröde Kristalle ohne Auftreten von Sprüngen plastisch deformiert werden, wenn man etwa durch Umgeben mit feinem Sand, Schellack, Schwefel, Kolophonium, Alaun u. dergl., auf welche starker Druck ausgeübt wird,

dafür sorgt, daß sie auf allen Stellen der Oberfläche so stark gedrückt werden, daß die Kohäsion übersteigende Zugspannungen nicht auftreten können.

106. Adhäsion. Bei Versuchen über die Adhäsion ist immer nur lückenhafte Berührung der beiden Körper vorhanden oder überhaupt keine direkte Berührung, insofern längs der ganzen Ausdehnung der Berührungsfläche eine fremde Substanz ausgebreitet ist. Es kann somit auch die wahre Adhäsion, der pro Quadratcentimeter nötige Zug, welcher Abreißen bewirken könnte, experimentell nicht bestimmt werden, ja sogar nicht einmal theoretisch, da vermutlich die Adhäsion etwa das arithmetische Mittel zwischen den Kohäsionen der beiden in Berührung stehenden Körper ist, so daß, auch wenn die genannten Schwierigkeiten beseitigt wären und man allmählich den Druck steigern würde, zunächst der schwächere von beiden Körpern durchreißen würde, ehe Trennung an der Berührungsstelle erfolgte.

Fig. 2291.

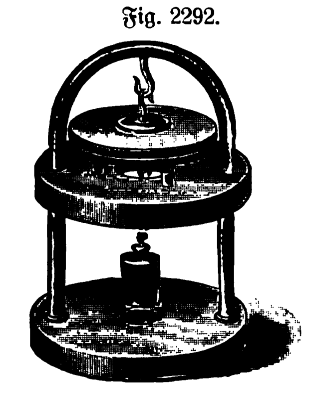


Fig. 2292.

„Adhäsionsplatten" (Fig. 2291) müssen sehr gut abgeschliffen sein und sorgfältig aufbewahrt werden. Nötigenfalls schleift man sie mit gepulvertem Bimsstein aufeinander ab.

Bei dem Versuche drückt man die wohlgereinigten Platten etwas drehend gegeneinander, ohne irgend ein Zwischenmittel anzuwenden; an den Handhaben zieht man dieselben auseinander, wobei sie aber sehr oft übereinander weggleiten.

Der starke Widerstand, den man beim plötzlichen Auseinanderziehen der Platten empfindet, rührt übrigens größtenteils vom Luftdruck her, da die Luft in den engen Zwischenraum nur schwer nachdringen kann. Soll der Versuch beweisend sein, so muß man dauernd eine Kraft wirken lassen, etwa in der Art, daß man die eine an einem Flaschenzug aufhängt, die andere an einem Dynamometer befestigt. Dabei muß für horizontale Richtung der Platten und senkrechten Zug gut gesorgt werden, sowie für Auffangen der unteren Platte, weil sie beim Herabfallen Schaden nehmen könnte. (Einen besonderen kleinen Apparat zeigt Fig. 2292, Lb, 10.)

Befindet sich nur Luft zwischen den Platten, so ist die Kraft gering, sie wird aber sehr beträchtlich, wenn man etwas Fett dazwischen bringt.

Zwei Bleicylinder von etwa 1 bis 2,5 cm Durchmesser und Länge werden zuerst mit der Feile und dann mit dem Federmesser wohl geebnet und im Schraubstocke aufeinandergepreßt; sie halten gewöhnlich so fest, daß man sie nur schwer wieder trennen kann. Sorgfältig muß dabei jede Spur von Fett vermieden werden.

Auch bei diesem Versuch wendet man zweckmäßig Flaschenzug und Dynamometer an, oder den S. 756 erwähnten Bohrmaschinentisch, welcher gestattet, ein angehängtes Gewicht allmählich wirken zu lassen.

Frisch durchschnittene Stücke von unvulkanisiertem Gummi vereinigen sich beim Zusammendrücken und Kneten sofort wieder so vollständig, daß die Schnittstelle nicht mehr zu erkennen ist.

Eine auffallende Adhäsion zu Glas zeigt Tischlerleim. Bei gut haftender Leimschicht werden Stücke aus dem Glase herausgerissen, wenn man die Verbin-

dung zu trennen sucht, oder wenn durch Eintrocknen des Leimes letzterer sich zusammenzieht.

Auch frisch geschliffene Glasplatten haften gut aneinander, weshalb man vermeiden muß, solche unmittelbar aufeinander zu schichten. Bekannt sind die Steinheilschen Hohlprismen, deren Platten ohne Kitt haften.

(Schreiben mit Bleistift auf Papier, sowie mit Aluminiumstift auf Glas, Gebrauch des Wischers, der Tuschierfarben, Pausen mit Graphit- und Blaupapier, Verkitten mit Wachs, Kautschuk, Marineleim, Zerschneiden von Seife mit Draht u. s. w.)

107. Friktionsrollen. Das sogenannte Fressen bei Transmissionslagern, der Widerstand der wälzenden Reibung u. s. w. beruhen ebenfalls auf der Wirkung der Adhäsion. Wie sehr die wälzende Reibung mit der Adhäsion zunimmt, kann man zeigen, wenn man eine messingene Walze zunächst eine reine Spiegelglasplatte herunterrollen läßt und sodann längs einer solchen, welche mit zähem Öl (durch Zusatz von Kolophonium verdickt) bestrichen ist. Umgekehrt kann die wälzende Reibung bei geringer Adhäsion kleiner werden als die gleitende, wovon man bei der Verwendung von Walzen, Wagenrädern u. s. w. Gebrauch macht.

Friktionsrollen können hier um so weniger unerwähnt bleiben, als man sich ihrer auch beim Aufhängen jeder größeren Glocke bedient (vergl. S. 765, Fig. 2279); ebensowenig die Kugellager, die bei jedem Fahrrad Anwendung finden.

108. Die Schweißung. Daß zwei einfach in Kontakt gebrachte oder nur schwach gegeneinander gedrückte Körper nicht so fest aneinander haften bleiben, als wären sie ein Stück, beruht darauf, daß stets eine dünne Luft- (wohl auch Fett-)schicht zwischen den Körpern bleibt und die direkte Berührung sich höchstens auf einzelne Punkte beschränkt. Durch starken Druck, welcher ausreicht, die Körper so zu deformieren, daß sie sich an der ganzen Grenzfläche dicht aneinander anschmiegen, tritt ein völliges Zusammenwachsen ein. In manchen Fällen kann dies leicht mit dem Apparate von W. Spring (S. 753, Fig. 2254) gezeigt werden.

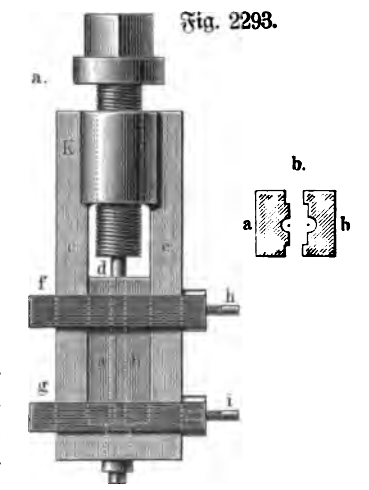


Fig. 2293.

Als Vorlesungsexperiment eignet sich besonders die Schweißung von geraspeltem Blei. Die Raspel, welche man zum Zerkleinern des Bleies gebraucht, sowie auch das Blei selbst müssen völlig fettfrei sein, ebenso Cylinder und Kolben. Selbstverständlich dürfen die Bleispäne auch nicht schon vor längerer Zeit verraspelt sein, da sie sich an der Luft rasch mit einer Oxydhaut überziehen, welche die Schweißung hindert. Schon bei 2000 Atmosphären schweißen die Späne zu einem massiven Block zusammen, der von einem gegossenen sich nicht unterscheidet.

Einfacher als der oben beschriebene ist der in Fig. 2293a dargestellte Apparat, bei welchem der Kolben *d* durch eine mittels eines langarmigen Schlüssels umzudrehende Schraube in den ebenfalls zweiteiligen (in Fig. 2293b im Querschnitt

dargestellten) Cylinder *ab* eingepreßt wird, dessen Hälften durch den Rahmen *ee* und die diesen umspannenden Zwingen *fh* und *gi* zusammengehalten werden. Beim Gebrauche spannt man den Rahmen in einen Schraubstock.

Wird nun etwa ein in den Cylinder einpassendes Bleistäbchen einem wachsenden Drucke ausgesetzt, so beginnt das Blei, sobald der Druck einen bestimmten Wert erreicht, wie eine breiartige Flüssigkeit aus den Fugen des Apparates oder aus einer absichtlich am unteren Ende angebrachten Öffnung herauszufließen, um so rascher, je höher der Druck gesteigert wird[1]). (Zahnplomben in Gold, Plattieren[2]).

109. Härten durch Deformation. Zerdrückt man einen großen Steinsalzwürfel in einer Presse, welche Drucke bis zu 50000 kg auszuüben gestattet, so deformiert sich derselbe zu einer durchsichtigen, völlig zusammenhängenden Platte, welche nur am Rande, wo Luft zutreten konnte, infolge vieler Sprünge weiß und zersplittert ist.

Derartig deformierte Kristalle zeigen naturgemäß gestörte Spaltbarkeit, ja es kann infolge der verschiedenen Orientierung der kleinsten Teilchen die Spaltbarkeit überhaupt beseitigt sein, d. h. die Masse zeigt höhere Spannungsgrenze. Metalle, wie Messing, Kupfer u. s. w., erhalten durch bleibende Deformation, z. B. durch Hämmern, größere Härte.

110. Transkristallisation. Natürlich ist bei Kristallen auch die Adhäsion von der Richtung abhängig. Eiskristalle, welche aneinandergedrückt werden, verschweißen; die Verbindung ist aber nur dann eine vollkommen innige, wenn die Verschweißung in genau gleicher Orientierung stattfindet. Findet, wie bei der Bewegung der Gletscher, beständige plastische Deformation einer Eismasse statt, so bleiben diejenigen Kristallfragmente, welche in richtiger Orientierung an ein größeres Korn angeschweißt sind, haften, während unrichtig orientierte wieder abgedrückt werden. Infolge dessen findet ein beständiges Wachsen der größeren Körner auf Kosten der kleineren statt.

111. Homöotropie. Versucht man ölsaures Ammoniak unter dem Mikroskop zwischen zwei Glasplatten durch Hin- und Herschieben der oberen zu deformieren, so erhält man immer wieder eine Masse von nahe einheitlicher, durch die Richtung der Verschiebung bestimmter Struktur.

Die Masse verhält sich also ähnlich wie ein Haufe Stäbchen, die zwischen zwei Platten hin und her gerollt werden und infolgedessen das Bestreben haben, sich zur Verschiebungsrichtung senkrecht zu stellen. Ein solches Bestreben deformierter Kristalle, eine Struktur anzunehmen, welche in Beziehung steht zu den Zug- und Druckrichtungen, zeigt sich ganz allgemein und wird als erzwungene Homöotropie bezeichnet, im Gegensatz zu der bereits oben erwähnten spontanen Homöotropie.

112. Polymorphismus und Amorphismus. Daß eine Substanz, wie z. B. Jodsilber, Quecksilberjodid u. s. w., in zwei verschieden kristallisierten Modifikationen

---

[1]) Eine kleine Schraubenpresse zum Komprimieren pulverförmiger Medikamente zu festen Tabletten liefert E. M. Reiniger in Erlangen. — [2]) Eine Bleiplatte mit einer Zinnplatte oder eine Kupfer- mit einer Silberplatte durch Glättwalzen gezogen vereinigen sich an der Berührungsfläche vollkommen. S. a. Trimetall, S. 381, Anm.

auftreten kann, glaubte man früher durch verschiedenartige Raumgitteranordnung der Moleküle erklären zu können. Ebenso deutete man das Vorkommen einer Substanz, z. B. Zucker, in kristallisiertem und amorphem Zustande durch unregelmäßige Lagerung der Moleküle in letzterem Falle. Beide Annahmen sind unzutreffend, weil sich die physikalischen Eigenschaften von Kristallen durch Deformation nicht ändern, wie das Verhalten plastischer, fließender und flüssiger Kristalle lehrt [1]), und weil Homöotropie die Entstehung völliger Regellosigkeit hindert.

113. Legierungen, physikalische Mischungen, feste Lösungen. Bringt man ein Stück Blei und ein Stück Gold in innigen Kontakt und überläßt die Kombination längere Zeit sich selbst, so dringen Spuren von Gold in das Blei ein, wie sich durch genaue chemische Analyse nachweisen läßt. Man bezeichnet diesen Vorgang als Diffusion des Goldes in das Blei oder als Lösung des Goldes im Blei. Das entstandene Produkt heißt Legierung, physikalische Mischung oder feste Lösung. Früher galt der Satz: „corpora non agunt, nisi fluida".

Die eindringenden Mengen sind auch bei langer Dauer des Versuchs so minimal, daß an eine Demonstration der Erscheinung nicht zu denken ist. Allerdings ermöglicht die Springsche Presse, bei Verwendung seiner Feilspäne verschiedener Metalle und wiederholte Zerteilung und abermalige Pressung des entstandenen Produkts, Legierungen herzustellen. Da aber die Kompression mit einer Umwandlung oder partiellen Verflüssigung infolge des Drucks verbunden sein kann, so [kommt] die Erscheinung dabei nicht in reiner Form zum Ausdruck.

Wahrscheinlich findet eine solche teilweise Verflüssigung auch statt bei dem [W]oodschen Metall, welches sich sehr leicht aus seinen Bestandteilen: 3 Cadmium, [3] Blei, 4 Zinn und 14 Wismut, im Apparat von W. Spring (S. 753) durch [Ko]mpression mit 6000 Atmosphären herstellen läßt. Gerade dieser Versuch eignet [sic]h besonders als Vorlesungsversuch.

Legt man Kochsalz auf Eis, so entsteht eine Flüssigkeit, Kochsalzlösung, selbst [we]nn die Temperatur weit unter dem Schmelzpunkt des Eises ist. Ebenso bilden [Ka]lium und Natrium, mit einander in Kontakt gebracht, eine flüssige Legierung.

Als physikalisch bezeichnet man eine solche Verbindung, wenn ihre Eigen[sch]aften die Mitte halten zwischen denen der Bestandteile, als chemisch im ent[ge]gengesetzten Fall.

114. Chemische Verbindungen durch Druck. Werden zwei feste Körper, welche [sich] chemisch miteinander unter Kontraktion vereinigen können, in möglichst reinem [Zu]stande fein pulverisiert, die Pulver miteinander gemischt und dann einem starken [Dr]ucke ausgesetzt, so entsteht die chemische Verbindung. Gewöhnlich enthält die [ent]standene Masse noch Teilchen der ursprünglichen Körper. Indem man sie aber [no]chmals pulverisiert, abermals komprimiert und so die Operation mehrmals [wi]ederholt, kann man schließlich eine ganz homogene Masse erhalten.

Der Druck braucht keine bestimmte Größe zu haben, da er nur nötig ist, um [die] Oberflächen in innige Berührung zu bringen.

Beispiele sind nach Spring: Schwefel und Kupferfeilspäne, Quecksilberchlorür [un]d Kupferfeilicht, Jodkalium und Quecksilberchlorid u. s. w.

---

[1]) Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann. S. 184 [bis] 210.

dargestellten) Cylinder *ab* eingepreßt wird, dessen Hälften durch den Rahmen *e* und die diesen umspannenden Zwingen *fh* und *gi* zusammengehalten werden. Bei Gebrauche spannt man den Rahmen in einen Schraubstock.

Wird nun etwa ein in den Cylinder einpassendes Bleistäbchen einem wachsende Drucke ausgesetzt, so beginnt das Blei, sobald der Druck einen bestimmten We erreicht, wie eine breiartige Flüssigkeit aus den Fugen des Apparates oder au einer absichtlich am unteren Ende angebrachten Öffnung herauszufließen, um | rascher, je höher der Druck gesteigert wird[1]). (Zahnplomben in Gold, Plattieren[2])

109. Härten durch Deformation. Zerdrückt man einen großen Steinsalz würfel in einer Presse, welche Drucke bis zu 50 000 kg auszuüben gestattet, | deformiert sich derselbe zu einer durchsichtigen, völlig zusammenhängenden Platt welche nur am Rande, wo Luft zutreten konnte, infolge vieler Sprünge weiß un zersplittert ist.

Derartig deformierte Kristalle zeigen naturgemäß gestörte Spaltbarkeit, ja e kann infolge der verschiedenen Orientierung der kleinsten Teilchen die Spaltbarkei überhaupt beseitigt sein, d. h. die Masse zeigt höhere Spannungsgrenze. Metall wie Messing, Kupfer u. s. w., erhalten durch bleibende Deformation, z. B. durc Hämmern, größere Härte.

110. Transkristallisation. Natürlich ist bei Kristallen auch die Adhäsion vo der Richtung abhängig. Eiskristalle, welche aneinandergedrückt werden, verschweißen die Verbindung ist aber nur dann eine vollkommen innige, wenn die Verschweißung in genau gleicher Orientierung stattfindet. Findet, wie bei der Bewegung der Gletscher, beständige plastische Deformation einer Eismasse statt, so bleiben diejenigen Kristallfragmente, welche in richtiger Orientierung an ein größeres Korn angeschweißt sind, haften, während unrichtig orientierte wieder abgedrückt werden. Infolge dessen findet ein beständiges Wachsen der größeren Körner auf Kosten der kleineren statt.

111. Homöotropie. Versucht man ölsaures Ammoniak unter dem Mikroskop zwischen zwei Glasplatten durch Hin- und Herschieben der oberen zu deformieren, so erhält man immer wieder eine Masse von nahe einheitlicher, durch die Richtung der Verschiebung bestimmter Struktur.

Die Masse verhält sich also ähnlich wie ein Haufe Stäbchen, die zwischen zwei Platten hin und her gerollt werden und infolgedessen das Bestreben haben, sich zur Verschiebungsrichtung senkrecht zu stellen. Ein solches Bestreben deformierter Kristalle, eine Struktur anzunehmen, welche in Beziehung steht zu den Zug- und Druckrichtungen, zeigt sich ganz allgemein und wird als erzwungene Homöotropie bezeichnet, im Gegensatz zu der bereits oben erwähnten spontanen Homöotropie.

112. Polymorphismus und Amorphismus. Daß eine Substanz, wie z. B. Jodsilber, Quecksilberjodid u. s. w., in zwei verschieden kristallisierten Modifikationen

---

[1]) Eine kleine Schraubenpresse zum Komprimieren pulverförmiger Medikamente zu festen Tabletten liefert E. M. Reiniger in Erlangen. — [2]) Eine Bleiplatte mit einer Zinnplatte oder eine Kupfer- mit einer Silberplatte durch Glättwalzen gezogen vereinigen sich an der Berührungsfläche vollkommen. S. a. Trimetall, S. 381, Anm.

auftreten kann, glaubte man früher durch verschiedenartige Raumgitteranordnung der Moleküle erklären zu können. Ebenso deutete man das Vorkommen einer Substanz, z. B. Zucker, in kristallisiertem und amorphem Zustande durch unregelmäßige Lagerung der Moleküle in letzterem Falle. Beide Annahmen sind unzutreffend, weil sich die physikalischen Eigenschaften von Kristallen durch Deformation nicht ändern, wie das Verhalten plastischer, fließender und flüssiger Kristalle lehrt [1]), und weil Homöotropie die Entstehung völliger Regellosigkeit hindert.

113. **Legierungen, physikalische Mischungen, feste Lösungen.** Bringt man ein Stück Blei und ein Stück Gold in innigen Kontakt und überläßt die Kombination längere Zeit sich selbst, so dringen Spuren von Gold in das Blei ein, wie sich durch genaue chemische Analyse nachweisen läßt. Man bezeichnet diesen Vorgang als Diffusion des Goldes in das Blei oder als Lösung des Goldes im Blei. Das entstandene Produkt heißt Legierung, physikalische Mischung oder feste Lösung. Früher galt der Satz: „corpora non agunt, nisi fluida".

Die eindringenden Mengen sind auch bei langer Dauer des Versuchs so minimal, daß an eine Demonstration der Erscheinung nicht zu denken ist. Allerdings ermöglicht die Springsche Presse, bei Verwendung feiner Feilspäne verschiedener Metalle und wiederholte Zerteilung und abermalige Pressung des entstandenen Produkts, Legierungen herzustellen. Da aber die Kompression mit einer Umwandlung oder partiellen Verflüssigung infolge des Drucks verbunden sein kann, so kommt die Erscheinung dabei nicht in reiner Form zum Ausdruck.

Wahrscheinlich findet eine solche teilweise Verflüssigung auch statt bei dem Woodschen Metall, welches sich sehr leicht aus seinen Bestandteilen: 3 Cadmium, 8 Blei, 4 Zinn und 14 Wismut, im Apparat von W. Spring (S. 753) durch Kompression mit 6000 Atmosphären herstellen läßt. Gerade dieser Versuch eignet sich besonders als Vorlesungsversuch.

Legt man Kochsalz auf Eis, so entsteht eine Flüssigkeit, Kochsalzlösung, selbst wenn die Temperatur weit unter dem Schmelzpunkt des Eises ist. Ebenso bilden Kalium und Natrium, mit einander in Kontakt gebracht, eine flüssige Legierung.

Als physikalisch bezeichnet man eine solche Verbindung, wenn ihre Eigenschaften die Mitte halten zwischen denen der Bestandteile, als chemisch im entgegengesetzten Fall.

114. **Chemische Verbindungen durch Druck.** Werden zwei feste Körper, welche sich chemisch miteinander unter Kontraktion vereinigen können, in möglichst reinem Zustande fein pulverisiert, die Pulver miteinander gemischt und dann einem starken Drucke ausgesetzt, so entsteht die chemische Verbindung. Gewöhnlich enthält die entstandene Masse noch Teilchen der ursprünglichen Körper. Indem man sie aber nochmals pulverisiert, abermals komprimiert und so die Operation mehrmals wiederholt, kann man schließlich eine ganz homogene Masse erhalten.

Der Druck braucht keine bestimmte Größe zu haben, da er nur nötig ist, um die Oberflächen in innige Berührung zu bringen.

Beispiele sind nach Spring: Schwefel und Kupferfeilspäne, Quecksilberchlorür und Kupferfeilicht, Jodkalium und Quecksilberchlorid u. s. w.

---

[1]) Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann. S. 184 und 210.

Flüssigkeiten, z. B. Schwefelsäure, Wasser, Alkohol u. s. w., und bestimmt das Gewicht (die Schwere) in Kilogrammen. Man erhält so das Gewicht eines Liters, d. h. das Eigengewicht in dem gewöhnlichen Maße. Im technischen System wäre es das Gewicht von 1 cbm in kg, im CGS-System das Gewicht von 1 ccm in Dynen.

Zweckmäßiger verwendet man, um Zeit zu sparen, mehrere tarierte Litergefäße. Man kann auch einen Maßcylinder mit der zu untersuchenden Flüssigkeit füllen und das Gewicht durch das abgemessene Volumen dividieren. Beispielsweise wogen 11 Liter Kupfervitriollösung 11,73 kg, somit ist $s = 1{,}026$.

Vergleicht man das Eigengewicht einer Flüssigkeit mit dem einer anderen, so erhält man das spezifische Gewicht in Bezug auf diese. Das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit, in Bezug auf Wasser, ist gleich dem Eigengewicht in kg pro cdm.

Zu genauen Bestimmungen wendet man ein Gläschen (Pyknometer, Tarierfläschchen) mit engem Halse und einem aufgeschliffenen Deckel oder eingeschliffenen,

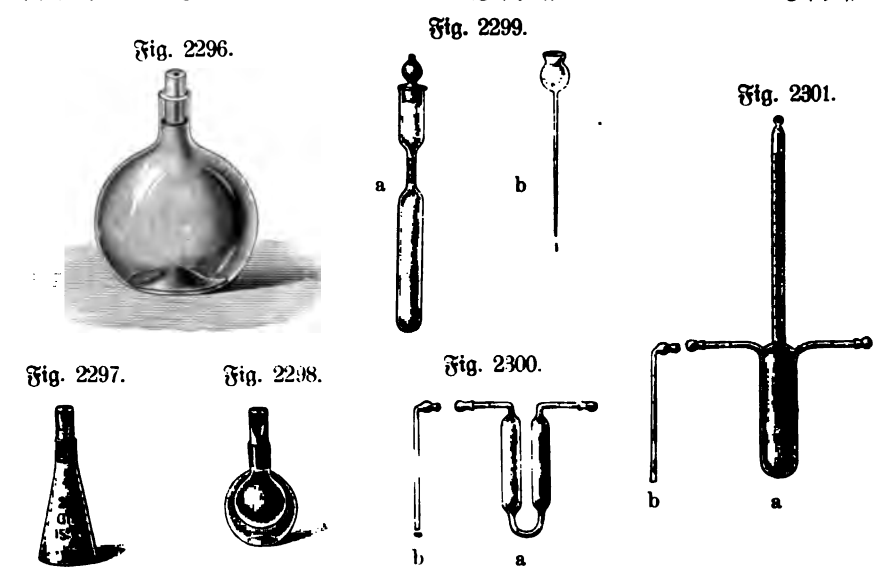


Fig. 2296. Fig. 2297. Fig. 2298. Fig. 2299. Fig. 2300. Fig. 2301.

aus einer Thermometerröhre gemachten Pfropfen an (Fig. 2296). Im ersten Falle schleift man den Rand des Glases und den Deckel zuerst einzeln mit Sand und Wasser auf einer ebenen Glasplatte; wenn der Sand überall gleichmäßig angegriffen hat, nimmt man geschlämmten Schmirgel, um beide fein matt aufeinander selbst abzuschleifen. Soll ein Stöpsel eingeschliffen werden, so wird zuerst der Hals des Gläschens mit einem konischen Messingzäpfchen auf der Drehbank roh ausgeschliffen, dann die an der Lampe konisch ausgezogene Glasröhre in einem Holzfutter auf die Drehbank gebracht und zuerst in eine um das Messingzäpfchen als Modell gebogene Hülse aus Zinkblech und dann in die Öffnung des Fläschchens unter beständigem Hin- und Herziehen mit feinem Schmirgel eingerieben. Das Einschleifen kann auch von Hand geschehen. In jedem Falle muß man ein Glas auswählen, das keine überflüssige Masse an sich hat. Das Gewicht des leeren, sowie des mit Wasser von einer bestimmten mittleren Temperatur (+ 15° C.) gefüllten Gefäßes wird ein für allemal durch wiederholte Versuche genau bestimmt und auf einem dem Apparate

beigelegten Zettel verzeichnet. Bei dem Versuche wird das Glas ganz gefüllt, die übrige Flüssigkeit muß durch die Öffnung im Zapfen entweichen. Man kann sich auch eines Fläschchens mit sehr engem Halse bedienen, auf dem ein Zeichen angebracht ist, bis zu welchem es gefüllt werden muß; etwa überschüssige Flüssigkeit kann durch Fließpapier entfernt werden. Verschiedene Pyknometerformen (zu beziehen von Fr. Hugershoff, Leipzig, Karolinenstraße 13) sind dargestellt in den Fig. 2297 bis 2301 (b bedeutet den Trichter zum Einfüllen oder die Ansaßröhre zum Einsaugen der Flüssigkeit).

Natürlich muß man vermeiden, das Pyknometer beim Gebrauch mit den Fingern zu berühren, da die Temperaturerhöhung Fehler bedingen würde.

Für genäherte Bestimmungen kann auch eine Pipette benutzt werden.

Beispielsweise ist das spezifische Gewicht bei 20° von:

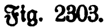
Petroleum	0,798	Schwefelkohlenstoff	1,272
Alkohol, absoluter	0,792	Schwefelsäure, konzentriert	1,850
Glycerin, wasserfrei	1,26	Quecksilber	13,596

Leybolds Nachf., Köln, liefern eine Anzahl Flüssigkeiten, geordnet nach dem spezifischen Volumen (Fig. 2302), zu 16 Mk.

Fig. 2302.



Ist das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit bekannt, so kann man leicht durch Abwiegen eines mit derselben gefüllten tarierten Gefäßes den Inhalt dieses Gefäßes bestimmen. Besonders geeignet hierzu sind Wasser und Quecksilber. Hieran schließen sich die Eichung einer genau cylindrisch befundenen Röhre (Bürette, Maßcylinder) durch Abwiegen der Quecksilberfüllung und Einteilung in gleiche Teile, die Querschnittsbestimmung einer Kapillarröhre durch Auswiegen mit Quecksilber u. s. w.


Fig. 2303.



Ein geeichter Maßcylinder kann dann umgekehrt zur Bestimmung des spezifischen Gewichts dienen.

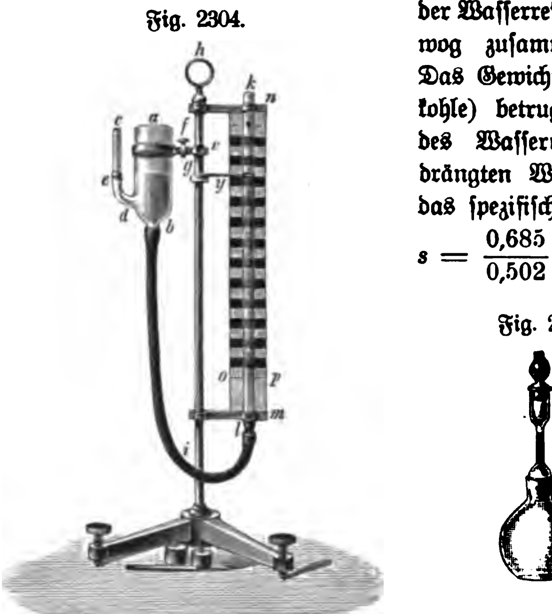
Pyknometer für feste Körper. Auch zur Bestimmung des Volumens fester Körper kann ein Maßcylinder dienen. Man füllt ihn zunächst teilweise mit Wasser, bringt darauf den Körper hinein und sieht zu, um wieviel Cubikcentimeter das Wasser gestiegen ist. Zu gleichem Zwecke dient Al Birunis Gefäß, welches bis zu einem Ausflußrohr mit Wasser gefüllt wird, so daß das beim Einbringen eines Körpers verdrängte Wasser in einem vor das Ausflußrohr gestellten Maßcylinder abgemessen werden kann (Fig 2303).

Mühlenbein (Z. 7, 23, 1893) benutzt ein Gefäß (Fig. 2304), welches durch einen Schlauch mit einer Bürette verbunden ist, welch letztere nach Einbringen des

Körpers um so viel gesenkt wird, daß das Wasser im Gefäß wieder die frühere Hö erhält, worauf man dann an der Bürette das Volumen des Körpers ablesen kan

Pyknometer zur Bestimmung des spezifischen Gewichts fester Körper müss einen genügend weiten Hals haben, um den Körper einbringen zu können. D Fig. 2305 und 2306 zeigen zwei gebräuchliche Formen. Für die Vorlesung b nutze ich einfach eine große Pulverflasche. Sie wog mit Wasser gefüllt 1,032 k

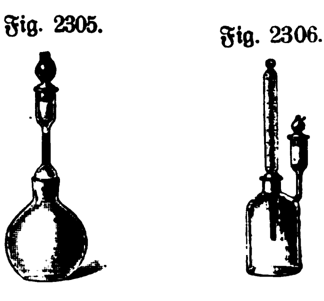
Fig. 2304.



der Wasserrest nach Einbringen des Körpe wog zusammen mit diesem 1,215 k Das Gewicht des Körpers allein (Stei kohle) betrug 0,685, somit das Gewic des Wasserrestes 0,540 und des ve drängten Wassers 0,502 kg. Also w das spezifische Gewicht der benutzten Kol

$$s = \frac{0,685}{0,502} = 1,36.$$

Fig. 2305. Fig. 2306.



. **120. Wasserzähler, Wasseruhren.** Zur fortlaufenden Messung größerer Flüssig keitsmengen kann z. B. eine sogenannte Kübelkette dienen, d. h. eine mit Kübel besetzte endlose Kette, welche über zwei Rollen geführt ist. Die Kübel entnehme bei Drehung der Rollen jeder ein bestimmtes Flüssigkeitsquantum aus dem tiefe stehenden Gefäß und entleeren es in das höher stehende, so daß sich aus der mittel eines Tourenzählers bestimmten Umdrehungszahl der Rollen sehr einfach die ge förderte Wassermenge berechnen läßt (Fig. 2069, S. 671). Man kann auch da Wasser oben einströmen und unten ablaufen lassen. Ferner kann der Tourenzähle so geeicht werden, daß er direkt die geförderte Wassermenge angibt. In diesem Fall wird die Vorrichtung Wasserzähler oder Wasseruhr genannt. Auch de schwingende Nachen Fig. 2033 (S. 649) gehört hierher.

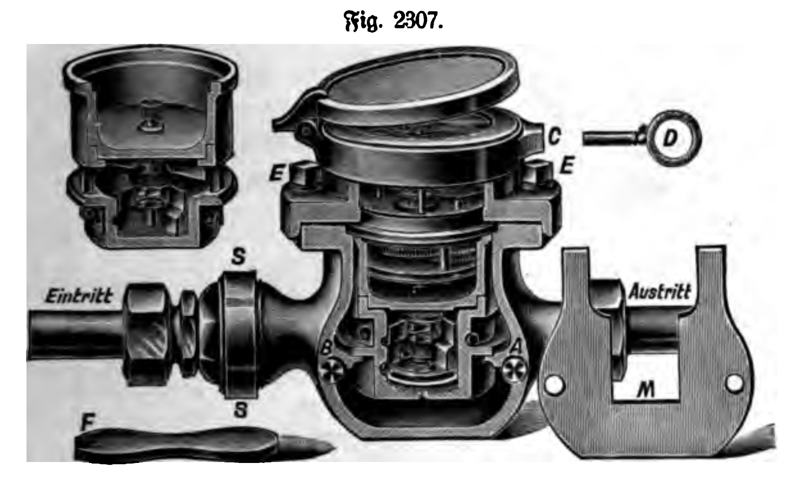
Zu gleichem Zwecke können die Kolbenwassermotoren (siehe S. 102) be nutzt werden, da jedem Hin- und Hergang des Kolbens der Durchgang einer be stimmten Wassermenge entspricht. Wegen der beträchtlichen Reibung des Kolbens benutzt man indes gewöhnlich eine abgeänderte Konstruktion, bei welcher an Stelle des Kolbens ein Flügelrad tritt, welches sich in einem entsprechenden runden Ge häuse leicht drehen kann und mit einem Tourenzähler verbunden ist. Einen Demonstrationswassermesser, bei welchem das Innere durch ein Fenster beobachtet werden kann (Fig. 2307) liefern Leybolds Nachf. in Köln zu 75 Mk.

Derselbe kann auch mit Druckluft (Wasserstrahlgebläse, Blasebalg u. dergl.) in Tätigkeit gesetzt werden. Zu diesem Zweck wird der Unterteil durch die Platte M

und die Schrauben *A* und *B* geschlossen. Man sieht dann, wie die Luft (das Wasser) durch die tangential gebohrten Öffnungen auf das Flügelrad strömt, dasselbe in Bewegung setzt, und wie diese Bewegung durch mehrfache Räderübersetzung auf die Zeiger übertragen wird. Bläst man an der Austrittsstelle Luft ein, so kommt das Flügelrad nicht ins Rotieren, zurückströmendes Wasser wirkt also bei diesem Einsatze nicht auf den Zähler.

Bei Wasserleitungen, welche keine Entlüfter oder Rückschlagventile besitzen, kann es vorkommen, daß infolge von Druckschwankungen Wasser durch die Messer fließt, ohne daß eine Entnahme in den Hausleitungen erfolgt. Der Grund hierfür ist in der Kompression von Luftsäcken zu suchen, welche sich bei dem Fehlen eines geeigneten Entlüfters an den höchsten Stellen des Rohrnetzes bilden können. Diese Luftsäcke werden durch die Wasserstöße, welche z. B. bei plötzlicher großer Wasserentnahme durch Öffnen und Schließen von Hydranten auftreten, zusammengedrückt und dehnen sich nach Aufhören des Stoßes wieder aus, so daß das Wasser durch

Fig. 2307.



[…] Messer hin und her fließt. Der nur vorwärts zählende Messer ohne Rückschlag[…]til würde nur die eintretenden Wassermengen addieren und daher mehr als den [tat]sächlichen Verbrauch anzeigen, während vor- und rückwärts zählende Messer das [rück]fließende Wasser subtrahieren und somit das genaue Verbrauchsquantum an[zei]gen. Dieses zu zeigen, ist dem Apparate noch ein zweiter Einsatz beigegeben, [bei] welchem auch die Ausströmungskanäle als Einströmungskanäle für das rückwärts [flie]ßende Wasser konstruiert sind und das rückwärts in das Gehäuse eintretende [Wa]sser tangential auf das Flügelrad trifft. Setzt man daher diesen Einsatz ein [un]d läßt die Luft an der Austrittsstelle eintreten, so sieht man, daß bei diesem [Ein]satze das Flügelrad jetzt in umgekehrtem Sinne rotiert, das zuviel eingeströmte [un]d daher wieder zurückfließende Wasser also wieder subtrahiert wird. Die beiden [Ein]sätze unterscheiden sich ferner durch die verschiedenen Regulierungsvorrichtungen, [ind]em bei dem einfachen Einsatze Kugelregulierung, bei dem vor- und rückwärts [zäh]lenden Messer Regulierung durch verstellbare Stauflügel angewandt ist, ent[spr]echend den Verhältnissen in der Praxis. Um die Einsätze auszuwechseln, wird [die Sch]raube *C* durch Schlüssel *D* gelöst und der Deckel abgehoben, dann werden die [Sch]rauben *E* mit Hilfe des Schlüssels *F* entfernt und das Zählwerk abgenommen. [Da]rauf läßt sich der Einsatz auswechseln. — Bei *SS* befindet sich ein Sieb, dessen

Zweck darin besteht, grobe Unreinigkeiten zurückzuhalten, und welches durch Lösen der Schraube freigelegt und gezeigt werden kann[1]).

Fig. 2308.



Fig. 2309.



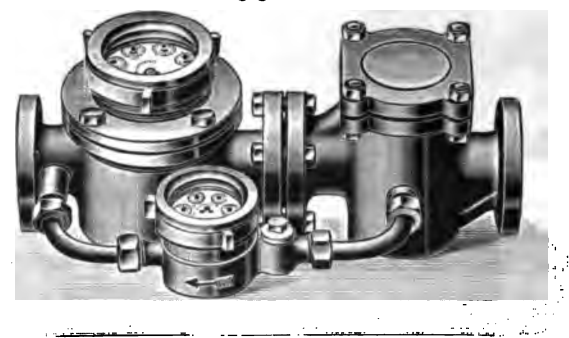
Fig. 2310.



Fig. 2312.



Fig. 2311.



121. Eimerkünste. Die Kübelkette kann nicht nur als Wassermesser dienen, sondern auch als Pumpe und als Wassermotor. Beim Gebrauch als Pumpe ergibt sich die zum Betrieb nötige Arbeit als Produkt des geförderten Wassergewichts mit der Förderhöhe. Im anderen Falle wird die geleistete Arbeit gemessen durch Produkt von Wassergewicht und Wassergefälle. Zum Betrieb oder zur Umsetzung der Arbeit in die gewünschte Form kann einer der früher beschriebenen Mechanismen, z. B. ein Räderwerk, benutzt werden. Die

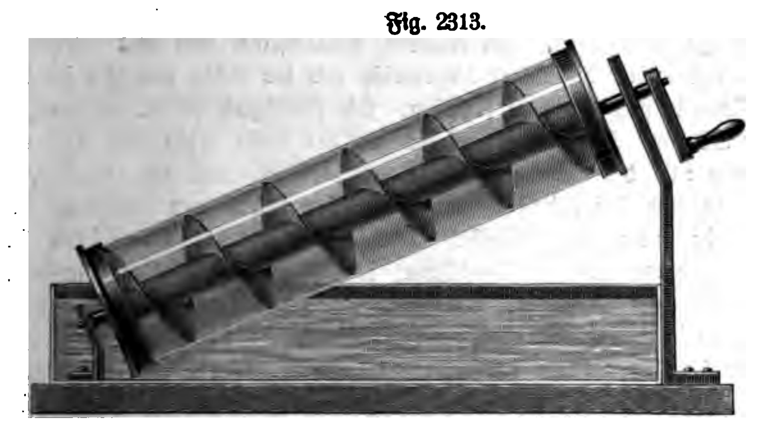
---

[1]) Verschiedenartige Wassermesser für den technischen Gebrauch liefert z. B. C. **Andrae**, Wassermesserfabrik, Stuttgart; Fig. 2308 zeigt einen Trockenläufer (Tourenzähler außerhalb des Wassers), Fig. 2309 einen Naßläufer, Fig. 2310 einen Zapfstellmesser, der sich z. B. bei Ausflußversuchen u. s. w. gebrauchen läßt, Fig. 2311 einen kombinierten Messer, welcher sowohl für kleine wie große Wassermengen zu gebrauchen ist. Wassermesser aus Hartgummi liefert E. Schinzel, Wien III 2, Löwengasse 40; Trommelflüssigkeitsmesser, z. B. zum Messen von Kesselspeisewasser, H. Reisert, Köln (Fig. 2312). Andere Bezugsquellen sind: Dreyer, Rosenkranz u. Droop, Armaturenfabrik, Hannover; Fr. Lux, Wassermesserfabrik, Ludwigshafen a. Rh.; Siemens u. Halske, A.-G., Berlin, Markgrafenstraße 94.

Berechnung des Kräftegleichgewichts bietet keine Schwierigkeiten. Ein komplizierterer Apparat ist der **schwingende Nachen** S. 649, Fig. 2033.

Die **Archimedische Schraube** zeigt Fig. 2313. Die Schraube ist aus Blech gemacht, und es sind die einzelnen Windungen der Schraube aus elliptischen Stücken

Fig. 2313.



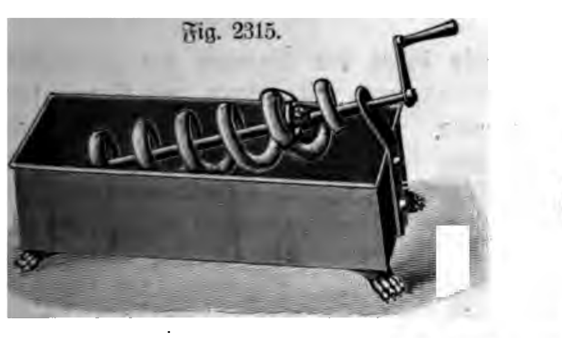


Fig. 2315.

Fig. 2314.

Fig. 2316.



: Fig. 2314, zusammengesetzt und
f die blecherne Achse gelötet. Das
as muß gut cylindrisch sein, da-
t die Schnecke darin ordentlich
ließe, da man keinen Kitt an-
nden kann, ohne die Durchsichtig-
t des Glases zu stören. Die
ffungen des Cylinders sind oben
d unten mit Löchern versehen für
ntritt und Austritt des Wassers,
lches aus dem mit der Schraube
:bundenen Wasserbehälter genom-
n wird und wieder dahin zurück-
ßt. (K. 18.)

Einfacher wird eine Röhre in Form einer cylindrischen Spirale gewunden und
f einer drehbaren Achse konaxial zur Cylinderfläche befestigt und ebenso wie
beschriebene Spirale in einem Troge aufgestellt (Fig. 2315 E, 12).

Hieran schließt sich auch die **Spiralpumpe** von H. Airy (1868), (Fig. 2316).
e durch Kurbel drehbare horizontale Achse durchdringt zwei Gefäße, die unten

durch eine gebogene Röhre kommunizieren, deren tiefster Punkt tiefer liegen muß als die zu erzeugende Druckhöhe, in Quecksilber gemessen. Auf der Achse befindet sich eine cylindrisch-spiralig gewundene eiserne Röhre, die durch die Achse in die beiden Gefäße eindringt und im ersten Gefäße in einem rechtwinklig abliegenden gebogenen Arm endigt, der dazu bestimmt ist, beim Drehen der Achse Flüssigkeit in dem Gefäße zu schöpfen. Im anderen, geschlossenen und mit Steigröhre versehenen Gefäße endigt die Röhre konzentrisch mit der Achse, um hier die im ersten Gefäße geschöpfte Flüssigkeit zu ergießen. Die Flüssigkeit im ersten Gefäße besteht nun zum Teil aus Quecksilber, welches bis zur Achse reicht und auch das Verbindungsrohr mit dem zweiten Gefäße erfüllt, zum Teil aus Wasser, welches mindestens so hoch steht, daß beim Drehen der Kurbel der schöpfende Arm der Spirale darin untergetaucht bleibt. Derselbe schöpft also abwechselnd bei jeder halben Drehung Wasser und Quecksilber, infolgedessen sind alle Spiralwindungen der Röhre halb mit Quecksilber, halb mit Wasser gefüllt, und dieses Gemisch wird allmählich bis in das zweite Gefäß fortgeschraubt, wo dann Trennung stattfindet, indem das Quecksilber durch das Kommunikationsrohr zum ersten Gefäße zurückkehrt, das Wasser dagegen durch das Steigrohr entweicht. Je mehr Windungen die Spirale hat, um so größer der erzeugte Druck [1]).

122. **Der hydrostatische Blasebalg** bildet den Übergang zur gewöhnlichen, bereits von Ktesibios erfundenen Kolbenpumpe mit Hähnen oder Ventil, sowie den Rotationspumpen. Um sich einen solchen Blasebalg selbst herzustellen, läßt man sich zwei Bretter aus hartem Holze kreisrund zuschneiden und einen etwa 15 cm breiten Streifen aus gutem Rindsleder so zusammennähen, daß er um die beiden Bretter als Grundflächen einen Cylinder bildet, Fig. 2317. Das eine Brett wird nahe am Rande mit einem konischen Loche versehen, wozu die Küfer eigene Bohrer haben, um in dieses später eine messingene Schraube (Fig. 2318 in größerem Maßstabe) einschrauben zu können. Das Holz wird zuerst mit fetter Ölfarbe angestrichen, dann das knapp passende Leder darüber gestreift und vorläufig durch ein paar Stifte befestigt. An der Stelle der Naht, welche einwärts gerichtet wird, schneidet man das Holz etwas aus und legt in die Fuge eine Mischung aus gleichen Teilen Wachs und Schweinefett, womit man, aber im warmen flüssigen Zustande, auch das Leder vorher einschmiert. Man nimmt nun einen hinreichend langen und so breiten Lederstreifen, als die Bretter dick sind, legt ihn auf das eigentliche Leder und nagelt beide Lederstücke durch eine doppelte Reihe dicht geschlagener Nägel an die Bretter, wo besonders die Stelle der Naht wohl zu berücksichtigen ist. Später schraubt man das Messingstück Fig. 2318 mit seiner etwas konischen Schraube in das Loch des oberen Brettes und kann nun auf die obere Schraube desselben ein


Fig. 2317. Fig. 2318.

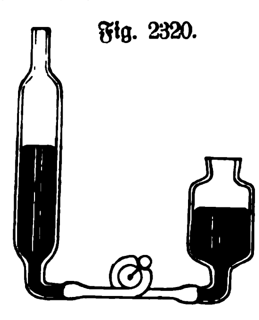
[1]) Eine Modifikation der Archimedischen Schraube ist ferner die Spiralpumpe von Wirtz (siehe Hopkins, Der prakt. Experimentalphysiker, S. 69), bestehend aus einer zu einer ebenen Spirale gewundenen Glasröhre, welche sich um eine horizontale Achse drehen läßt.

T-Stück mit zwei Hähnen befestigen, deren einer mit dem zu entleerenden, der andere mit dem zu füllenden Behälter verbunden wird. Vor allem ermöglicht die Vorrichtung auch durch Auflegen eines Gewichtes auf das obere Brett einen meßbaren Druck auf die Flüssigkeit auszuüben.

Eventuell kann zu gleichem Zwecke auch ein Kautschukbeutel mit angesetztem Hahn benutzt werden.

123. Membranpumpen. Erwähnung verdienen auch die sogenannten Membranpumpen [1]), bei welchen durch Eindrücken und Ausziehen einer elastischen Membran das Volumen des Stiefels geändert wird. Smith (Mech. Mag. LIV, 192) z. B. bedeckt eine ringförmige Rinne mit einer elastischen Membran, welche an einer Stelle niedergedrückt und dort dicht an die Rinne befestigt wird. Rechts und links von dieser Stelle befinden sich in der Rinne Saug- und Druckventil an den Mündungen der von unten eintretenden Röhren. Rollt man nun eine Kugel, welche genau in die Rinne paßt, auf derselben im Kreise herum, so daß sie die Membran dicht an die Rinne andrückt, so entsteht hinter derselben Verdünnung, davor Verdichtung, somit wirkt der Apparat als Pumpe.


Fig. 2319.


Fig. 2320.

Eine besonders interessante und praktische Membranpumpe ist die Schlauchpumpe von Fueß [2]). Sie besteht, wie Fig. 2320 zeigt, lediglich aus einem die beiden Gefäße verbindenden Kautschukschlauch, welcher um eine kreisförmige Scheibe gelegt ist und an einer Stelle durch eine kleine Rolle zusammengequetscht wird, diese läßt sich an einer Kurbel um die Scheibe herumführen, so daß sie das den Schlauch erfüllende Fluidum (Wasser, Quecksilber, Luft) vor sich hinschiebt bezw. hinter sich herzieht.

Die Pumpe bedarf keiner Ventile, was dadurch erreicht ist, daß der um die Scheibe gelegte Schlauch etwas mehr als eine ganze Windung bildet, so daß auf einer kleinen Strecke der Schlauch doppelt liegt. Die Pumpe wirkt als Saug- oder Druckpumpe, je nach der Richtung, in welcher die Rolle bewegt wird.

124. Die Druckpumpe. Der Kolben wird aufgezogen bis über eine seitliche Öffnung des Stiefels. Dann fließt durch diese Wasser in den Stiefel ein. Schiebt man nun den Kolben wieder hinunter, so wird das eingedrungene Wasser durch ein Druckventil hinausgepreßt. Modelle sind von Leybolds Nachf. ganz aus Glas gefertigt zu erhalten [3]).

Modifikationen der gewöhnlichen Druckpumpen sind die Schieberpumpe, als welche z. B. ein Dampfmaschinenmodell oder ein Schmidtscher Wassermotor

[1]) Solche sind zu beziehen von Hehr u. Co. in Ruhrort; P. Delseit, Köln, Moselstraße 64 (Diaphragmapumpe Fig. 2319). — [2]) Zu beziehen von R. Fueß, Steglitz C., Berlin, Düntherstr. 8, zu 60 bis 75 Mk. — [3]) Kessel- und Rohrprüfungspumpen für Druck bis 25 Atmosphären liefert Sonnenthal, Berlin C., Neue Promenade 6, zum Preise von 55 bis 125 Mk.

(siehe S. 103) gebraucht werden kann, die **Rotationspumpe**, welche ebenfalls durch eines der später beschriebenen Motorenmodelle veranschaulicht werden kann, und zahlreiche andere Konstruktionen[1]).

Eine **Kapselpumpe**, wie sie von den Siemens-Schuckert-Werken in Berlin geliefert wird, ist dargestellt in Fig. 2322. Die Pumpenwelle ist im Gehäuse zu einem dicht anschließenden Cylinder verdickt. Unten besitzt das Gehäuse eine Er-

Fig. 2321 a. Fig. 2321 b. Fig. 2321 c.



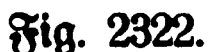
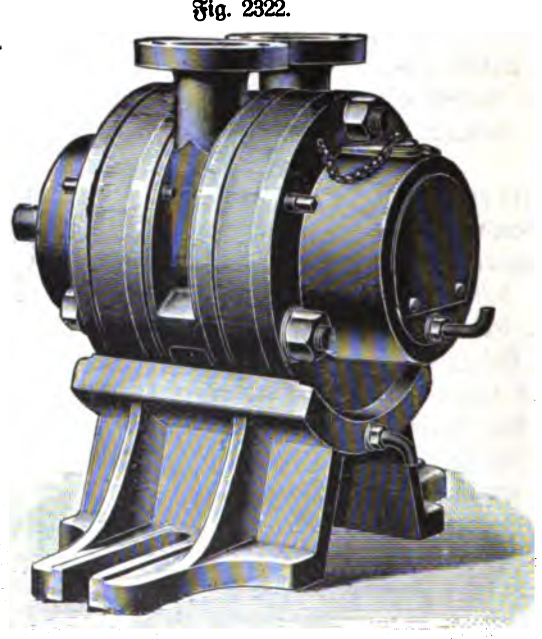


Fig. 2322.



weiterung, in welche zwei in den Cylinder genau eingepaßte zu einander recht-winklige Schieber bei der Rotation hineingleiten können. Sie teilen diesen Arbeits-raum in Saugraum und Druckraum.

125. Kolbenmanometer. Wirkt eine Kraft auf eine Flüssigkeit, z. B. vermittelst des hydrostatischen Blasebalgs oder eines Kolbens, der sich dicht anschließend in einem mit der Flüssigkeit gefüllten Cylinder verschieben kann, so sucht die Flüssigkeit zu entweichen und verschiebt etwa vorhandene bewegliche Teile der Gefäßwandung mit einer Kraft, die entsprechend dem ausgeübten Drucke wächst. Diese Kraft ist stets **senkrecht zur Wand gerichtet**, sobald Gleichgewicht eingetreten ist.

[1]) Modelle von Ventilen nach Fig. 2321 a bis c liefern **Leybolds Nachf.** in Köln zu 30 Mk.

Zur Messung des Druckes macht man einen Teil der Wandung dadurch beweglich, in gleicher Art wie bei dem Apparate, der den Druck erzeugt, indem man ihn z. B. als Kolben gestaltet, der sich dicht anschließend in einem Cylinder bewegen kann, oder nach dem Prinzip des hydrostatischen Blasebalgs. Zur Messung der Kraft ist die Kolbenstange mit einer Wagschale versehen, auf welche sich Gewichte auflegen lassen. Sind nun wie bei Fig. 2323 die beiden Kolben gleich groß, so ergibt sich, daß im Falle des Gleichgewichts auch die beiden Gewichte gleich groß sind. Es ist dies eine direkte Folge des Prinzips der Erhaltung der Energie, ebenso wie das Gleichgewicht zweier gleichen Gewichtsteine, die durch eine über eine Rolle gelegte Schnur verbunden sind. Denkt man sich eine virtuelle Verschiebung ausgeführt, so steigt das eine Gewicht ebensoviel, als das andere sinkt, denn die auf einer Seite verdrängte Flüssigkeitsmenge kommt auf der anderen hinzu. Kraft und Last müssen also gleich sein, und man kann durch eine solche Vorrichtung ähnlich wie durch eine feste Rolle die Richtung einer gegebenen Kraft in eine andere verwandeln.

Fig. 2323.

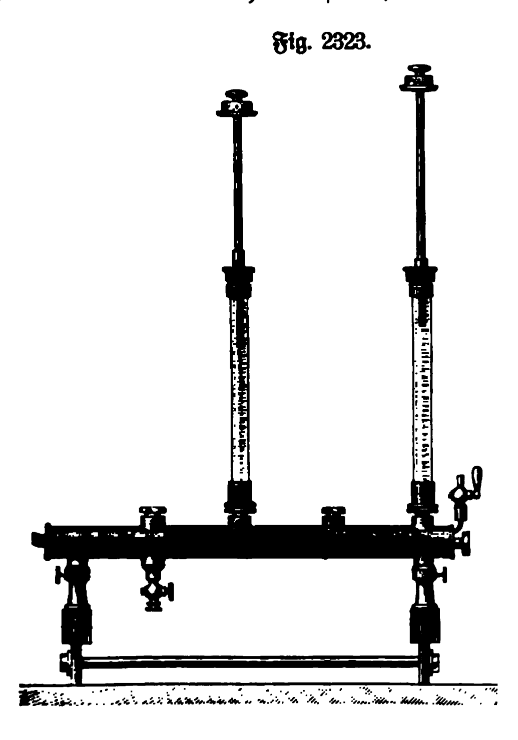
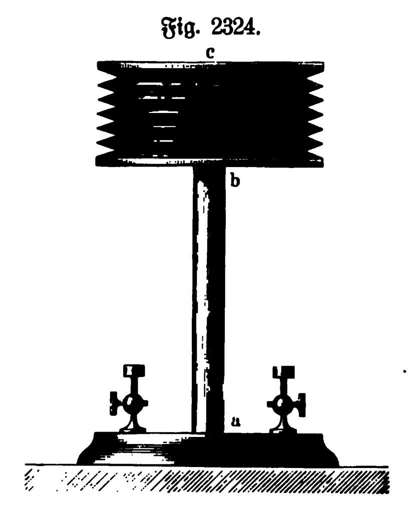


Fig. 2324.



Eine dem gleichem Zwecke dienende Vorrichtung zeigt Fig. 2324.

Auf einer Fußplatte steht vertikal die Röhre *ab*, an welche sich das ausziehbare Gefäß *bc* anschließt, dessen Seitenwandung aus Kautschuk mit versteifenden Einlagen an den ebenen Teilen (oder Pergamentpapier mit Chromatleim zusammengeklebt) besteht, während Boden und Deckel aus Metall verfertigt sind. An den Deckel setzt sich im Innern des Gefäßes ein vertikal herabhängender dreiseitig prismatischer Stab an, welcher in das Rohr *ab* hineinragt und für den Blasebalgauszug eine Führung bildet, so daß derselbe beim Auflegen von Gewichten nicht umkippen kann. Das Ende *a* der Röhre ist von der Unterseite der Fußplatte zugänglich und durch einen Stöpsel mit Gewinde verschließbar. Es steht außerdem mit den beiden Hähnen zur Seite in Verbindung. Vor dem Gebrauch füllt man den Apparat in umgekehrter Stellung nach Lösung des Stöpsels mit Wasser, wobei man durch Öffnen und wieder Schließen der Hähne dafür sorgt, daß die Luft aus letzteren

entfernt wird, schraubt den Stöpsel ein und bringt den Apparat wieder in normale Stellung. Hierauf füllt man eines der Trichterchen, welche das obere Ende der Hähne bilden, mit Wasser und setzt das Ende eines mit Wasser gefüllten Kupferkapillarrohrs oder Bleirohrs hinein, dessen anderes Ende vorläufig mit dem Finger verschlossen wird. Das Ende des Verbindungsrohres ist mit einem Konus versehen, welcher in die Bohrung des Hahnes genau einpaßt und durch Anziehen einer Überwurfsschraube darin völlig wasserdicht befestigt werden kann. Ebenso werden dann die Kapillare mit einem zweiten Apparat verbunden und sodann die Hähne geöffnet, so daß die Apparate miteinander in Kommunikation kommen. Drückt man nun eine der Deckplatten nieder, so steigt die andere auf, die verbrauchte Arbeit ist gleich der gewonnenen.

Versieht man das Gefäß Fig. 2323 mit einem zweiten oder dritten Cylinder gleicher Art und läßt wieder eine virtuelle Verschiebung sich vollziehen, derart, daß das eine Gewicht herunter geht, die anderen zwei oder drei dagegen steigen, so verteilt sich die im ersten Cylinder verdrängte Flüssigkeit auf die zwei bezw. drei anderen Cylinder. Es ist aber nicht ohne weiteres ersichtlich, ob die Verteilung eine gleichmäßige ist, oder ob vielleicht auf den nächsten Cylinder der größere Teil entfällt. Die Lösung der Schwierigkeit ergibt sich dagegen, wenn man abwechselnd nur den einen oder anderen der Kolben verschoben denkt, woraus folgt, daß in jedem im Falle des Gleichgewichts die gleiche Kraft wirken muß, daß somit die Fortpflanzung des Druckes eine gleichmäßige ist. Verbindet man also die zwei oder drei steigenden Kolben, so muß auf sie im Falle des Gleichgewichts das zwei- bezw. dreifache Gewicht aufgelegt werden, wie es dem Gesetz der Erhaltung der Energie entspricht, da die Verschiebung der verkuppelten Kolben nur die Hälfte bezw. ein Drittel derjenigen des absteigenden beträgt. Gleiches wird natürlich gelten, wenn man, wie Fig. 2325 darstellt, die zwei oder drei verkuppelten Kolben durch einen einzigen von zwei- bezw. dreifachem Querschnitt ersetzt [1]). (Fig. 2326 Lb, 150.)

Ich benutze zu diesem Zwecke den in Figur 2335 dargestellten Manometerprüfungsapparat, bei welchem das Manometer durch einen engen Cylinder mit Kolben und Wagschale ersetzt wird [2]) oder auch eine hydraulische Presse, deren kleiner Kolben durch einen solchen mit aufgesetzter Wagschale ersetzt wird. Die Brücke der Presse wird entfernt und der große Kolben mittels des Aufzugs direkt mit Gewichten belastet.

Will man sich auf einfachere Weise behelfen, so dient dazu ein beliebiges, aber starkes Blechgefäß mit zwei cylindrischen Ansätzen, wie Fig. 2327. In diese Ansätze paßt man gut schließende Korke, wovon der für den engeren Ansatz bestimmte lang und ebenfalls cylindrisch sein muß; der andere Kork darf nur einige Millimeter tief eingesteckt werden und überhaupt nicht fest gehen. Füllt man das Gefäß mit Wasser und schlägt den kleineren Kork rasch hinein, so wird der größere mit Gewalt herausgeworfen. An einem zweiten Gefäße kann man beide Öffnungen nach oben richten lassen [3]).

---

[1]) Über einen Komparator, bei welchem nach ähnlichem Prinzip eine kleine Verschiebung eines großen Kolbens durch Änderung des Wasserstandes in einem engen Rohr deutlich sichtbar gemacht wird, siehe Fuchs, Z. 16, 343, 1903. — [2]) Der Apparat Fig. 2325 ist als Teil eines hydrostatischen Universalapparats von M. Kohl in Chemnitz zu beziehen. — [3]) Fig. 2328 zeigt einen vollkommeneren Apparat dieser Art, zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln zu 90 Mk.

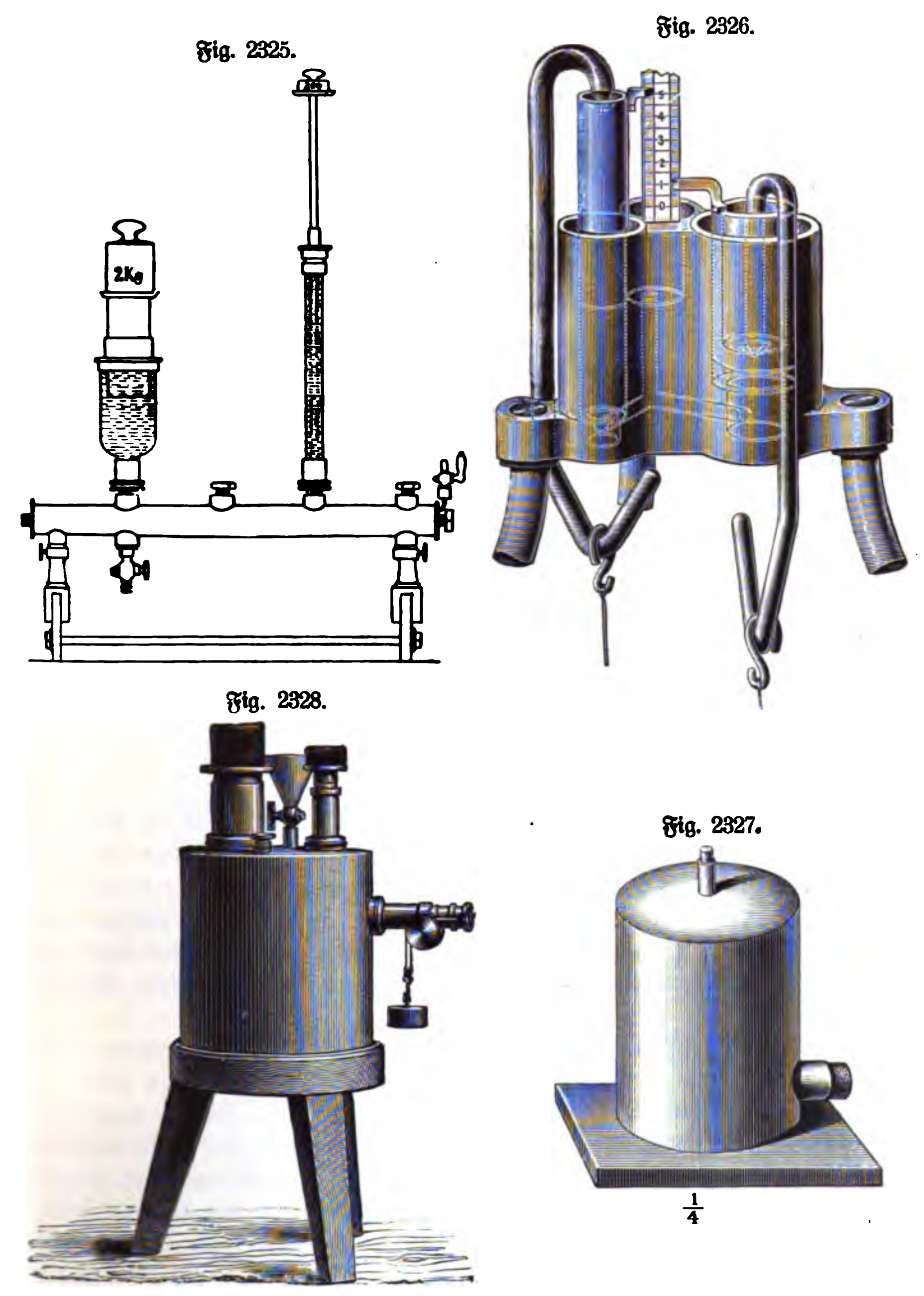


Fig. 2325. Fig. 2326. Fig. 2328. Fig. 2327.

$\frac{1}{4}$

Recknagel (Z. 7, 7, 1893) setzt die beiden mit Kolben versehenen Cylinder auf ein relativ großes mit Wasser gefülltes Glasgefäß auf[1]).

Zu Demonstrationen in großem Maßstabe benutze ich zwei Kautschuksäcke von sehr verschiedener Größe, welche mit Wasser gefüllt durch einen Schlauch in Verbindung gesetzt und sodann durch aufgelegte Bretter und Gewichte gepreßt werden. Man kann deutlich sehen, wie ein relativ kleines Gewicht, auf den kleinen Sack

[1]) Der Apparat ist zu beziehen von H. Köpping in Nürnberg zu 50 Mk.

wirkend, dessen Inhalt in den großen hinein treibt, trotz der auf diesem lastenden sehr großen Gewichte.

Alle diese Versuche bestätigen also die Anwendbarkeit der goldenen Regel auf die Hydrostatik. Das Produkt aus Kraft × Weg muß stets gleich sein dem Produkt aus Last × Weg oder, was auf der einen Seite an Kraft gewonnen wird, wird an Weg verloren.

126. Die Einheit des Flüssigkeitsdruckes. Die vorhergehenden Versuche zeigen, daß, wenn auf eine Flüssigkeit ein Druck ausgeübt wird, gleich große Flächenstücke der Gefäßwandung gleiche Drucke auszuhalten haben. Hieraus ergibt sich die Maßeinheit für den Flüssigkeitsdruck, als welche im technischen System zu bezeichnen wäre ein Druck von 1 kg pro Quadratmeter (gewöhnlich 1 kg pro Quadratcentimeter); im absoluten System der Druck von 1 Dyne pro Quadratcentimeter[1]).

127. Die Druckwage (Wagemanometer). Zur Messung größerer Flüssigkeitsdrucke ist die direkte Belastung der Kolbenstange durch Gewichte (Kolbenmanometer) wie bei den vorigen Versuchen nicht gut anwendbar.

Man benutzt dann Hebelübersetzung, indem man ähnlich wie beim Sicherheitsventil die Gewichte an den langen Arm eines einarmigen Hebels anhängt, dessen kurzer Arm auf die Kolbenstange drückt[2]). Zur Demonstration benutze ich geradezu ein Sicherheitsventil. Dabei muß natürlich auch das Gewicht des Hebels, welches in dessen Schwerpunkt angreift, berücksichtigt werden.

Um aus dem Druck in kg pro qcm denjenigen in CGS-Einheiten zu erhalten ist mit 981 000 zu multiplizieren.

128. Federmanometer. Benutzt man ein Kolbenmanometer in Verbindung mit einer Federwage, um den Druck auf den Kolben auszuüben, oder sind die beweglichen Teile der Gefäßwandung elastisch, so wird die Verschiebung so weit gehen, bis die erzeugte elastische Spannung dieser Wände dem Drucke der Flüssigkeit gleich ist. Man hat somit in der Verschiebung solcher Teile ein Maß für den Flüssigkeitsdruck, ähnlich wie die Verschiebung eines Dynamometers Kräfte fester Körper zu messen gestattet.

Die Federmanometer sind solche Gefäße mit elastischen beweglichen Wandteilen, welche sich mit dem Gefäße, in welchem der Druck gemessen werden soll, durch Kautschukschläuche oder Metallröhren verbinden lassen. Die Plattenmanometer bestehen aus einer cylindrischen Dose, bei welcher entweder Deckel und Boden beweglich, d. h. aus dünnem, in konzentrischen Ringen gewelltem Blech hergestellt sind oder bei welchen die cylindrische Wandung sich nach Art des Blasebalges einer sogenannten Ziehharmonika (Fig. 2324) in der Richtung der Achse verlängern oder verkürzen kann.

Parragh (1887) benutzt zur Erklärung des Plattenmanometers eine mit elastischem Deckel verschlossene Kapsel, welche mit dem Gefäße, in dem der Druck bestimmt werden soll, durch einen Schlauch in Verbindung steht. Sie wird so auf-

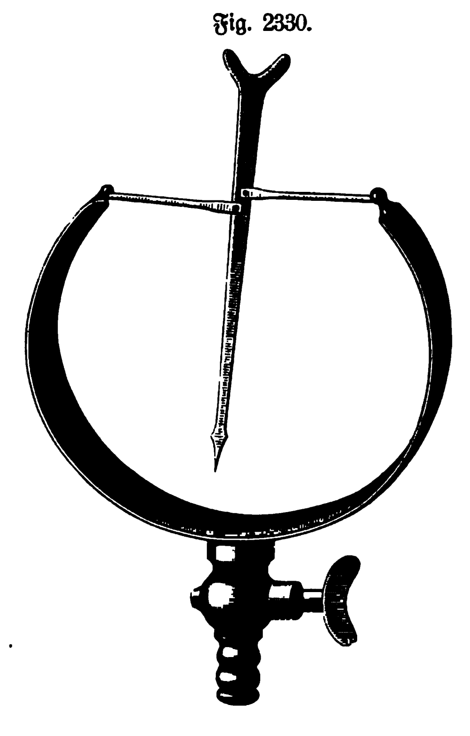
[1]) Der Flüssigkeitsdruck hat mehr als zwei Angriffspunkte, ist also entweder ein System von wahren Kräften oder von Trägheitskräften (S. 666). Die Molekulartheorie nimmt letzteres an übereinstimmend mit der Thermodynamik. — [2]) Druckwagen dieser Art liefert Mechaniker Stückrath in Berlin. Siehe auch Ztschr. f. Instrumentenk. 23, 252, 1902.

gestellt, daß der Deckel nach unten gerichtet ist. An letzterem ist ein feiner Faden **befestigt, der ähnlich wie das Haar bei einem Hygrometer um eine Rolle mit Zeiger oder Spiegel geschlungen und durch ein kleines Gewichtchen beschwert ist. Ent-**

Fig. 2329.

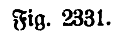


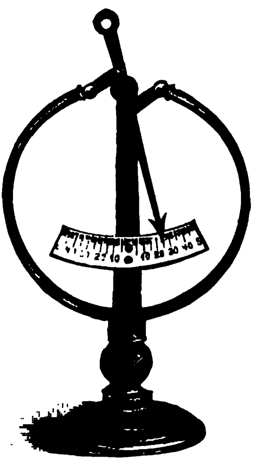
Fig. 2330.



sprechend den Bewegungen der elastischen Membran be- **wegt sich auch** der Zeiger.

Fig. 2331.





Bei den Röhrenmanometern (Fig. 2329) ist der **bewegliche Teil ein dünnes elastisches Rohr,** welches ent- **weder in Form einer ebenen** oder einer cylindrischen **Spirale gebogen ist, die sich bei Zunahme** des Druckes **aufzurollen sucht, bei Abnahme dagegen** wieder zusammen- **rollt. Für starke Drucke genügt** schon ein kurzer Bogen **einer solchen Spirale.**

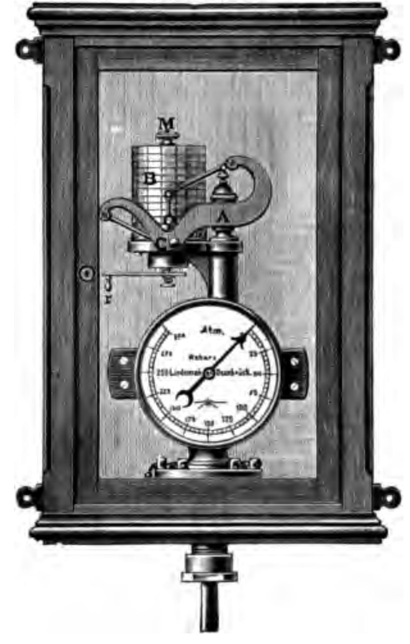
Das Prinzip des Röhrenmanometers zeige ich mittels **einer cylindrisch-spiralig gewundenen Messingröhre,** welche **an einem Ende geschlossen und** mit Zeiger versehen ist. **Der Druck wird mit Cailletets** Pumpe ausgeübt [1]).

Emsmann verwendet Bourdons Röhre in der **Form Fig. 2330 (K, 18) und** Fig. 2331 (Lb, 24) **(Aneroidring). Es** ist ein hohler Ring aus möglichst **dünnem Messingblech von etwa** 5 cm Halbmesser, 3 cm Breite und in der Mitte $\frac{1}{2}$ cm **Dicke, der jedoch nicht** zum vollen Kreise geschlossen ist, sondern eine Lücke

[1]) **Über cylindrische Aneroidspiralen** von großer Empfindlichkeit siehe Barus, **Z. 9, 290, 1896.**

von $1^1/_2$ cm Öffnung hat. Dieser Lücke gegenüber befindet sich auf der äußeren Seite des Ringes ein kurzer Rohransatz mit Hahn, um denselben mit dem Apparate in Verbindung bringen zu können, in welchem Wasser oder Luft einem Drucke ausgesetzt wird, also im einfachsten Falle mit einer Schweinsblase (Kautschukblase) oder einer Art Knallbüchse oder Spritze, wie sie als Spielzeug jedem Knaben bekannt ist.

Fig. 2332.



Um zu ermitteln, ob der Ring an allen Nähten völlig luftdicht hält, was natürlich durchaus nötig ist, taucht man denselben in Wasser und verdichtet die Luft im Inneren durch Einblasen. Sind undichte Stellen vorhanden, so entweicht an diesen die Luft in Form von kleinen Bläschen [1]).

Dienen solche Instrumente nur zur Schätzung des Drucks, so heißen sie Manoskope, dagegen Manometer, wenn sie geeicht sind. Bei letzteren wird gewöhnlich die Verschiebung nicht direkt durch das Rohrende auf einer Skala angegeben, sondern durch einen besonderen Zeiger, welcher durch ein geeignetes Hebelwerk mit dem beweglichen Rohre bezw. dem Deckel der Dose in Verbindung steht [2]).

Ein selbsttätig registrierendes hydraulisches Kontrollmanometer mit graphischer Darstellung des Druckes unter Angabe der Zeit (Fig. 2332) ist zu beziehen von der Osnabrücker Maschinenfabrik R. Lindemann, Osnabrück, Spezialfabrik für hydraulische Anlagen.

129. Gleichmäßige Fortpflanzung des Drucks. Mehrere Manoskope lassen sich dadurch in ihren Angaben übereinstimmend machen, daß man sie nacheinander an ein und dasselbe Gefäß ansetzt, in welchem jeweils der gleiche Druck erzeugt wird, wie man an einem anderen dauernd daran befestigten Manometer kontrollieren kann. Besitzt man eine Anzahl solcher Manometer, welche in ihren Angaben übereinstimmend sind, und verbindet dieselben durch Kautschukschläuche, enge Bleiröhren oder durch spiralig gewundene kapillare Kupferröhren alle zu gleicher Zeit mit dem Gefäße, wobei man die Röhrenleitungen in recht auffälliger Weise verschiedenartig weit ausdehnt, biegt oder verzweigt, so wird man dann, sobald Druck gegeben wird, sehen, daß alle Manometer genau denselben Druck angeben; es ist somit das Gesetz von der gleichförmigen Fortpflanzung des Druckes bewiesen. Freilich ist

[1]) Ein ähnliches Modell des Federmanometers liefern Ducretet u. Le Jeune in Paris zum Preise von 15 Francs. — [2]) Manometer sind zu beziehen von Schäffer und Budenberg, Dampfkesselarmaturenfabrik in Buckau-Magdeburg; Steinle und Hartung in Quedlinburg (bis 2000 kg pro Quadratcentimeter zu 20 bis 80 Mk. und mehr); O. M. Hempel, Manometerfabrik, Berlin SW., Zimmerstraße 99 (vergl. auch S. 19, Fig. 6); C. D. v. Gäbler, Manometerbauanstalt, Hamburg, Spaldingstraße 57; Dreyer, Rosenkranz und Droop, Armaturenfabrik, Hannover; Armaturenfabrik G. Elshorst, Köln a. Rh., Zollstock; Eug. Albrecht, Univers.-Mechan., Tübingen, Uhlandstraße 8.

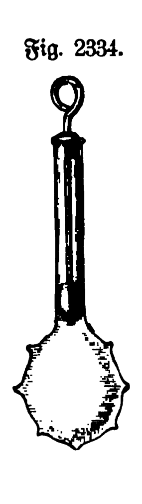
darauf zu achten, daß alle Manometer sich in der gleichen Horizontalebene , da andernfalls noch die Differenzen des Flüssigkeitsdruckes infolge der raft sich addieren; man kann aber diese Schwierigkeit auch dadurch umgehen, n die Zeiger der Manometer nach Herstellung des Gleichgewichts ohne justiert, daß sie alle auf 0 zeigen. Bei dem geringen Betrage der in Be- mmenden Druckdifferenzen wird dadurch kein merklicher Fehler in den An- er Manometer hervorgerufen.

m man derartige Manometer nicht beschaffen, so könnte man sich auch mit Blasen behelfen und dieselben durch enge Kautschukschläuche oder enge Glas- mit dem Gefäße verbinden, in welchem der Druck ausgeübt wird. Man ie die Blasen alle gleichmäßig sich aufblähen, falls sie überhaupt aus igem Material bestehen. M. Kohl liefert zu gleichem Zwecke ein würfel- Gefäß mit eingesetzten membranen (Fig. 2333

Fig. 2333.



Fig. 2334.



Im allereinfachsten gnügt man sich mit t Spritze aus Glas, m Ende kugelförmig : und nicht nur mit ndern mit vielen in enften Richtungen ge- Spitzen versehen ist. eselbe mit Wasser ge- d der Kolben einge- so wird das Wasser n Spitzen in ganz der Weise herausgepreßt. 34 Lb, 2,50.)

onsky (1885) macht auf folgende interessante Frage aufmerksam, durch nan Schüler (und auch andere Leute) in Verlegenheit bringen und zur der Vorstellungen und Begriffe wesentlich beitragen kann. Man denke sich loffenes Gefäß mit Wasser gefüllt, welches durch eine angesetzte Röhren- mit einem Druckapparat in Verbindung steht. Die Röhre sei durch einen rschließbar. Wenn nun nach Herstellung eines bestimmten Flüssigkeitsdruckes n geschlossen wird, herrscht in der abgeschlossenen Flüssigkeit im Gefäße nun- ch derselbe Druck wie zuvor, oder ist der Druck hier verschwunden? Nach kys Erfahrungen beantworten die Schüler ausnahmslos die Frage im Sinne, und doch ist die Antwort falsch.

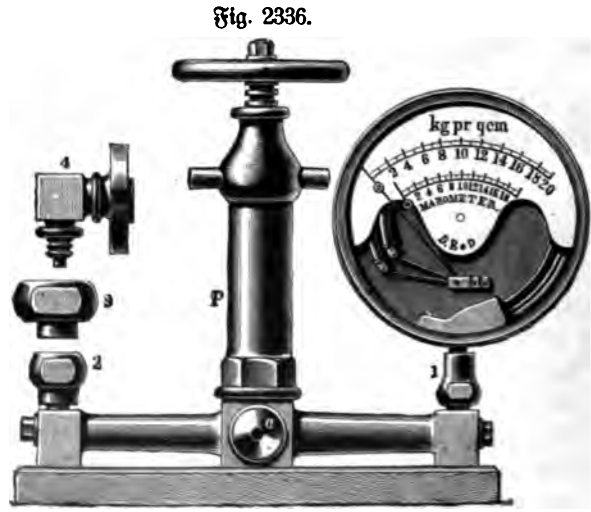
n kann diese irrige Vorstellung leicht dadurch berichtigen, daß man als nen Kautschukbeutel nimmt und zeigt, daß dieser nach dem Schließen des ebenso aufgebläht bleibt wie zuvor und durch eine oben angebrachte mit (oder Hahn) verschlossene Öffnung nach Ausziehen des Stopfens das n kräftigem Strahle herausspringt. Erst wenn kein Wasser mehr austritt, el sich wieder auf seine normale Größe zusammengezogen hat, ist der rschwunden. (Besser als ein Beutel wäre ein oben mit Kautschukmembran enes Gefäß mit breiter Öffnung und zwei seitlichen Hähnen.) Benutzt Gefäß mit minder ausdehnbaren Wänden, so läßt sich an einem ange-

setzten Federmanometer erkennen, daß der Anfangsdruck immer derselbe ist, daß aber der Druck nach Öffnen des Ausflußhahnes rascher sinkt bei geschlossenem Verbindungshahn als im anderen Falle. Wie verhält es sich, wenn die Gefäßwände absolut starr sind? Diese rein theoretische und daher nebensächliche Frage kann erst beantwortet werden nach Besprechung der Kompressibilität der Flüssigkeiten. Wie verhält es sich, wenn die Gefäßwände absolut starr sind und die Flüssigkeit absolut inkompressibel ist? Diese Frage gehört nicht mehr in das Gebiet der Physik.

Fig. 2335.



Fig. 2336.



130. Eichung der Federmanometer. Fig. 2335 stellt einen einfachen Apparat zur Prüfung der Federmanometer dar, welcher von der Aktiengesellschaft Schäffer und Walker, Berlin SW., Lindenstraße 18, zum Preise von 125 Mk. geliefert wird. Die Gebrauchsanweisung lautet:

Nachdem man den Apparat mit Hilfe der an demselben befindlichen Libelle genau wagerecht gestellt hat, füllt man den Cylinder bei herausgehobenem Kolben mit Glycerin an, bis sich dasselbe an der oberen Mündung des linksseitigen, offen gehaltenen Manometerhahnes zeigt; dann schraubt man das zu prüfende Manometer auf und füllt von der Cylinderseite noch etwas nach. Führt man jetzt den sorgfältig rein zu haltenden Kolben in den Cylinder ein, so belastet der Kolben mit Teller die Flüssigkeit bezw. das Manometer um 1 Atm., nach welcher sich der Zeiger genau einstellt, wenn man den Teller in schwache Drehung versetzt. Dies ist nötig, um die geringe Reibung zwischen den Metallwänden und dem Glycerin unmerklich zu machen. Die zur weiteren Prüfung erforderlichen Scheiben

lege man behutsam auf und versäume zur genauen Einstellung des Zeigers nie, die erwähnte Drehung des Tellers vorzunehmen.

Sollte der Kolben nach längerem Gebrauche, oder bevor man den gewünschten Druck erreicht hat, unten zum Aufsitzen kommen, so schließe man den Hahn und lasse so das Manometer unter Druck stehen, ziehe den Kolben, nachdem man ihn von den Gewichten befreit hat, heraus, fülle aufs neue Glycerin zu, setze den Kolben wieder ein, belaste ihn, wie er vorher belastet war, öffne dann den Hahn wieder und belaste weiter.

Bevor das Manometer vom Apparate genommen wird, ist der Kolben zu entlasten und aus dem Cylinder so hoch herauszuheben, bis der Zeiger des Manometers auf 0 steht; alsdann ist der Hahn zu schließen und das Manometer abzuschrauben. — Zum Ablassen der Flüssigkeit nach gänzlicher Entlastung und Abnahme von Manometer und Kolben ist ein Hähnchen an der Seite der Fußplatte vorhanden.

Fig. 2336 zeigt eine Manometerprobierpumpe zur Vergleichung mehrerer Manometer. (Zu beziehen von Dreyer, Rosenkranz u. Droop, Hannover.)

Durch Verbindung eines großen Kautschuk-Sackes mit einem empfindlichen Federmanometer und Variieren der aufgelegten Gewichte kann man bei Demonstrationen im großen eine zwar rohe, aber instruktive Eichung des letzteren ausführen.

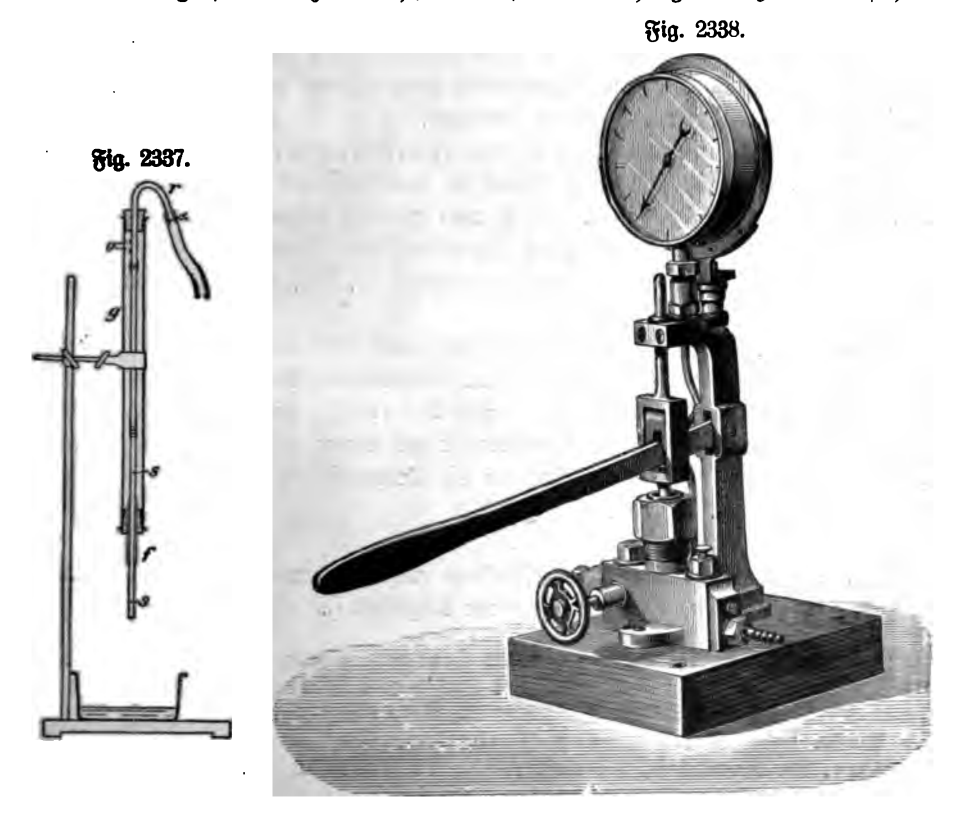


Fig. 2337.

Fig. 2338.

131. Messung der Druckelastizität und Festigkeit durch Wasserdruck. Einen Apparat zur Beobachtung der Längsdehnung eines Gummischlauches, wenn sowohl auf die innere wie äußere Fläche desselben der Druck der Wasserleitung wirkt, beschreibt Rebenstorff (Z. 15, 286, 1902). Derselbe ist in Fig. 2337 dargestellt, in

welcher bedeuten g eine weite Glasröhre, r eine enge gebogene Röhre mit engen Seitenlöchern o, welche mit der Wasserleitung in Verbindung steht, s einen Glasstab, welcher leicht beweglich durch die Röhre f hindurch geführt ist. Das untergesetzte Gefäß dient zum Aufsammeln des herausrinnenden Wassers. Bei 1,1 Atm. Druck wurde der 5 mm starke Glasstab um 5 cm vorgetrieben.

In ähnlicher Weise würde sich auch die Volumelastizität fester Körper bestimmen lassen, indem man etwa die Verkürzung eines in eine Glasröhre eingeschlossenen Kautschukstabes bestimmt. Zur Erzeugung des Druckes dient dabei zweckmäßig die Cailletetsche Pumpe Fig. 2338 (Lb, 350).

Zu rascheren Druckänderungen dient der lange Hebel, zu kleineren, namentlich bei höheren Drucken, die seitliche Druckschraube. Außer dieser ist noch eine Ventilschraube angebracht zum Abspannen des Druckes. Die Ventile bestehen aus Ebonit und müssen sorgfältig rein gehalten werden. Zur Füllung dient am bequemsten Glycerin, doch kann auch destilliertes Wasser gebraucht werden.

132. Festigkeitsbestimmungen. Pumpt man mit Cailletetscher Pumpe, welche mit einem bis 300 kg pro Quadratcentimeter reichenden Manometer versehen ist, Glycerin in eine am Ende geschlossene, schon zuvor damit angefüllte Glasröhre, welche zum Schutze gegen umherfliegende Splitter mit einem Cylinder von engmaschigem Drahtnetz umgeben ist, so kann man sehr gut beobachten, bei welchem Druck dieselbe zertrümmert wird (gewöhnlich etwa 100 kg pro Quadratcentimeter) und daraus die Festigkeit des Glases berechnen.

Man hat auch hydraulische Sprengpatronen für Bergwerksbetrieb hergestellt, wobei eine 20 Zoll lange Röhre in das Bohrloch eingeführt und durch einen Wasserdruck von 300 Atm. zum Platzen gebracht wird.

Hier könnten ferner Beispiele der Herstellung von Hohlkörpern durch hydraulische Pressung von Huber (siehe Prometheus 12, 769, 1901) gegeben werden.

133. Sicherheitsventil. Die Einrichtung eines Sicherheitsventils demonstriere ich an einem für Drucke bis etwa 8 Atm. eingerichteten Ventil, bezogen von der Maschinenfabrik vormals Klein, Becker u. Schanzlin in Frankenthal, welches zusammen mit einem großen Federmanometer auf einem eisernen Stativ montiert ist. Der Wasserdruck wird durch eine an die Transmission angeschlossene Speisepumpe hervorgebracht. (Vergl. auch § 127.)

134. Hydraulische Presse. Verschiedene einfachere und kompliziertere Modelle derselben sind in den nachstehenden Figuren dargestellt[1]).

[1]) Eine große in Verbindung mit der Druckwasserleitung zu gebrauchende Presse zeigt Fig. 2339, sie wird geliefert von Carl Hasse und Wrede, Fabrik f. Präzisions-Werkzeugmaschinen, Berlin N. 39, Fennstraße 21. Andere Bezugsquellen für große hydraulische Pressen sind: Fried. Krupp, Grusonwerk, Magdeburg-Buckau; Gebrüder Benckiser, Maschinenfabrik, Pforzheim; Eduard Laeis u. Co., Eisengießerei und Maschinenfabrik in Trier; R. Lindemann, Spezialfabrik f. hydr. Anlagen, Osnabrück; Nürnberger Feuerlöschgeräte- u. Maschinenfabrik, vorm. Justus Christ. Braun, Nürnberg; Armaturenfabrik Klein, Becker u. Schanzlin, Frankenthal; Deutsche Waffen- und Munitionsfabriken, Karlsruhe; W. F. Heim, Maschinenfabrik, Offenbach a. M.; G. Siempelkamp u. Co., Maschinen- u. Armaturenfabrik, Krefeld; Lorenz, Maschinenfabrik, Ettlingen u. a.

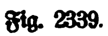


Fig. 2339.



Fig. 2340.



Fig. 2341.



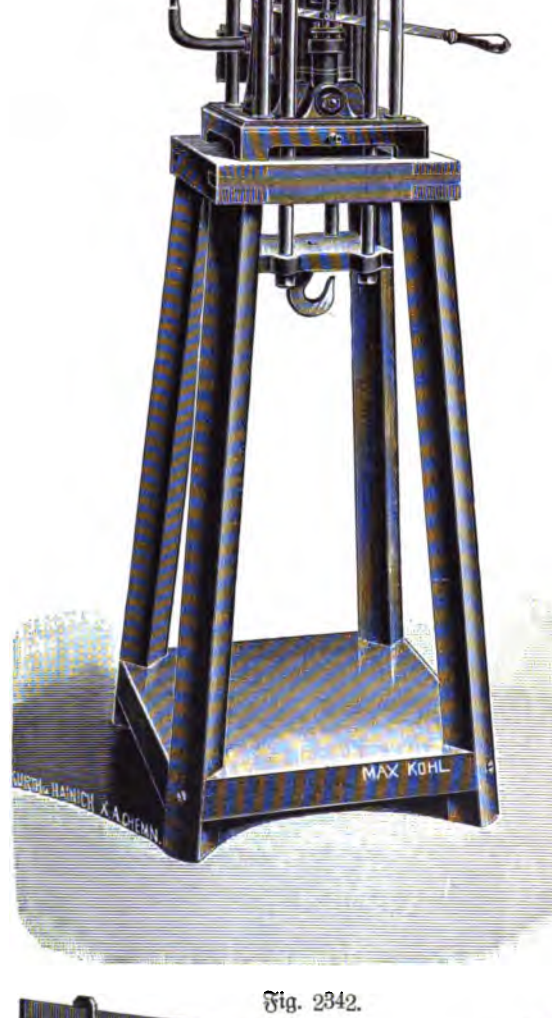


Fig. 2342.

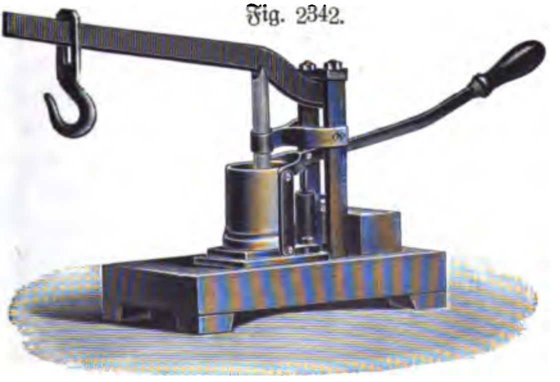
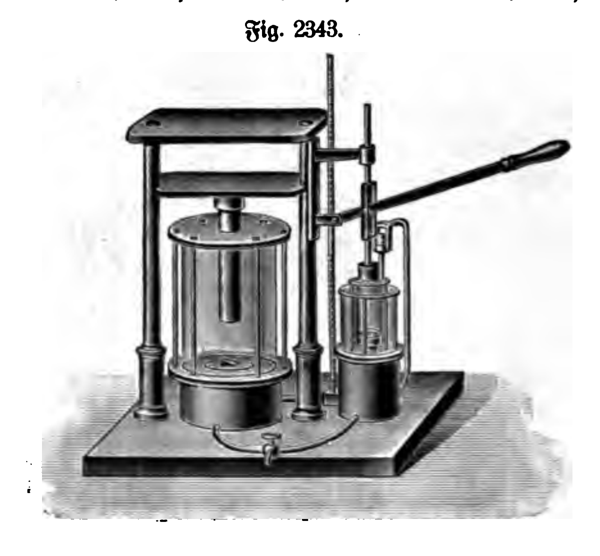


Fig. 2340 zeigt eine besonders einfache, in Verbindung mit der eben beschriebenen Cailletetschen Pumpe zu benutzende hydraulische Presse, welche einen Druck von 300 Atm. aushält und eine Pressung von 10 000 kg erzeugt. (Lb, 600 bis 680 Mk.)

Modelle von hydraulischen Pressen zeigen die Fig. 2341 K, 350; 2342 Lb, 130; 2343 Lb, 150; 2344 E, 215; 2345 L u. M, 120; 2346 E, 200. Bei letzterem ist die in neuerer Zeit bei Pumpen, insbesondere Feuerspritzen, in Aufnahme gekommene Anordnung der Ventile in einem Konus adoptiert und dadurch der wesentliche Vorteil erreicht, daß der die Ventile tragende, ähnlich wie ein Hahnzapfen eingeschliffene Konus sehr leicht, nach Lösen einer einzigen Schraube, herausgezogen und gereinigt werden können. Es ereignet sich namentlich bei wenig Vorsicht sehr leicht, daß sich kleine Körperchen, etwa erhärtete Teilchen von Fett, Fäserchen u. dergl. zwischen die Ventile und deren Sitz einklemmen, so daß dann der Apparat nicht mehr funktionieren kann. Sind nun die Ventile schwer zugänglich, so wird die Beseitigung der Störung sehr weitläufig und zeitraubend.

Fig. 2343.



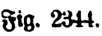
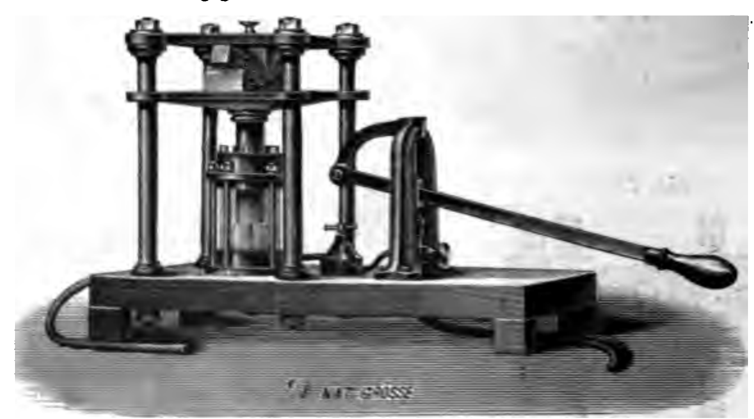


Fig. 2344.



Die Dichtung des Pumpenkolbens in dem Stiefel ist durch eine mit Lederscheiben gefüllte Stopfbüchse bewirkt. Beginnt hier das Wasser durchzusickern, so hat man nur nötig, die Schraube, welche die Lederscheiben zusammenpreßt, so weit anzuziehen, bis die Störung verschwunden ist.

Etwas schwieriger ist die Wiederherstellung der Dichtung beim Preßkolben. Dieselbe wird durch eine Ledermanschette (Stulp) bewirkt, welche nach längerem

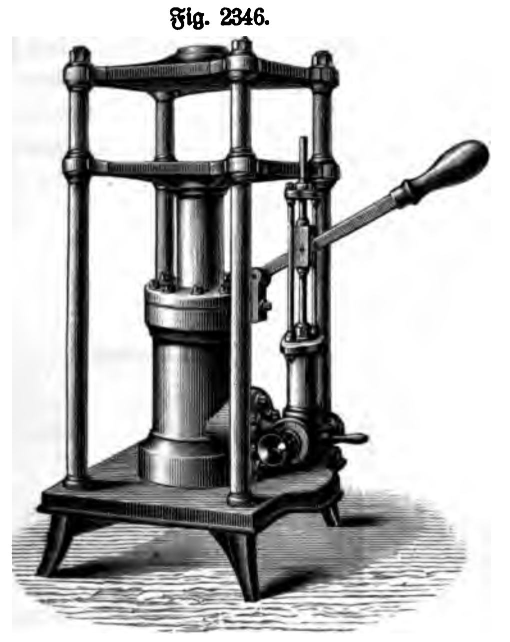
Stehen des Apparates so steif wird, daß sie ohne weiteres keine Dichtung mehr zu bewirken im stande ist. Man muß sie dann nach Lösen des auf den Cylinder aufgeschraubten Preßringes herausnehmen und in warmes (nicht etwa kochendes) Öl einlegen, bis sie wieder geschmeidig geworden ist. Alsdann streift man sie wieder über den Kolben und befestigt sie mittels des Preßringes.

Ist die Lederdichtung auf solche Art nicht mehr in stand zu setzen, so wird man einen neuen Ring einsetzen müssen. Man muß dazu drei eiserne Ringe haben, so daß der innere Durchmesser des größeren gleich ist dem äußeren Durchmesser des Lederringes; bei dem zweiten müssen Durchmesser und Dicke des Ringes gleich

Fig. 2345.



Fig. 2346.



sein dem zwischen beiden Lederringen zu erzeugenden Raume *a*, Fig. 2347; der dritte endlich ist ein massiver Cylinder gleich dem inneren freien Raume oder dem Kolben. Man nimmt starkes Zeugleder, macht dasselbe durch Reiben in warmem Wasser recht weich und preßt sodann den zweiten Ring über den innersten, indem man die entstehenden Lederfalten niederarbeitet und das Leder streckt und zieht. Man weicht dann das Leder ohne Entfernung der Ringe wieder ein, hält die beiden inneren Ringe durch einen darauf gesetzten Holzcylinder und eine Schraubzwinge nieder, setzt den äußeren Ring auf und preßt ihn unter beständigem Ziehen und Drücken ebenfalls herunter. Man läßt das Ganze stehen, bis das Leder ziemlich trocken ist, worauf man es öffnet, das Leder mit Tran und Talg bestreicht und die Ringe wieder einpreßt; das übrige Leder wird jetzt abgeschnitten, und man wartet das vollständige Trocknen des Leders ab, ehe man die Ringe entfernt.

Fig. 2347.



Bezüglich des Gebrauchs der hydraulischen Presse ist ferner noch zu bemerken, daß dafür gesorgt werden muß, daß keine Luft in den Pumpenstiefel eintritt, d. h. daß das Saugrohr immer unter Wasser bleibt. Ist letzteres ein Kautschukschlauch, so befestigt man an das Ende ein Stückchen Bleirohr, welches ihn unter Wasser

Innern eines Glasballons befindet. Mittels der Pumpe und durch Öffnen der Verbindungsleitungen mit dem rechteckigen Wasserbehälter, Fig. 2352 (E, 75), wird zunächst das ganze System mit Wasser gefüllt, wobei die Luft durch den auf dem Ballon angebrachten Hahn entweicht. Nun schließt man diesen, ferner auch den Hahn *C*, und stellt mit der Pumpe eine Druckdifferenz her, welche durch die Manometer *a* und *b* angezeigt wird und sich nicht ändert, wenn man *A* schließt. Steht *B* mit dem Wasserbehälter in Verbindung, so ist dort der Druck Null. Schließt man *B* und öffnet *C*, so zeigen beide Manometer gleichen Druck. Dieser sinkt auf Null, wenn *B* geöffnet wird u. s. w. Der Hahn *C* ist das Analogon des Entladers. Ein in diese Leitung eingeschalteter Motor würde die aufgespeicherte potentielle Energie in Arbeit umsetzen.

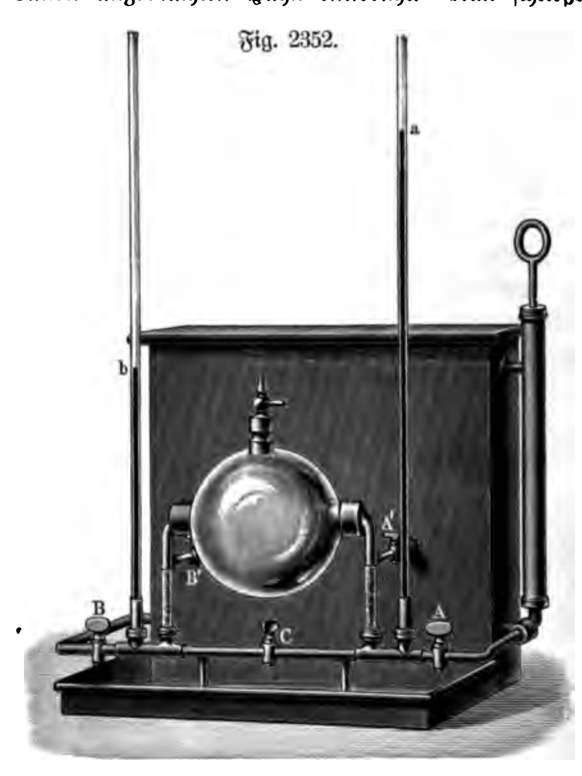


Fig. 2352.

Man könnte auch als Analogon elektrischer Erscheinungen hier die *Arbeit zur Füllung eines Wasserbehälters*, sowie die in einer *Talsperre* aufgespeicherte

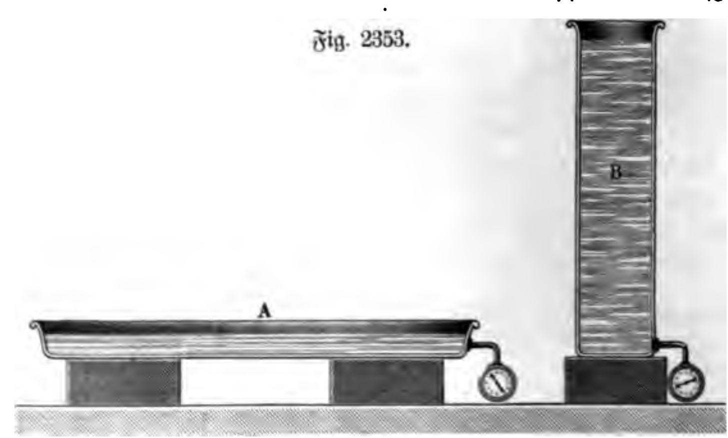


Fig. 2353.

potentielle Energie berechnen (Wassergewicht × Höhe des Schwerpunktes, welch letztere z. B. für einen Cylinder gleich der halben Höhe des Wasserstandes ist).

Wäre z. B. das Wasser zuerst in dem flachen Gefäße *A* (Fig. 2353) enthalten, so wäre die potentielle Energie sehr klein, würde man aber dem Gefäß die Form *B* geben, so wäre die potentielle Energie erheblich größer. Falls es uns

was leicht möglich ist, wenn der Flüssigkeitsbehälter höher als der Pumpenstiefel gelegt wird.

Da durch aufgelegte Gewichte oder Dynamometer selbst unter Anwendung von Hebeln, Flaschenzügen u. dergl. die bedeutende Wirkung hydraulischer Pressen sich nicht gut direkt zeigen läßt, so verwendet man zum Nachweis derselben zweckmäßig die Festigkeit von Holz, welche bereits früher bestimmt wurde [1]).

Um diese bedeutende Kraftwirkung zu zeigen, werden auf die Platte des Preßkolbens zwei Prismen (Schneiden) aus hartem Holze aufgelegt, darauf ein Stab aus Fichtenholz von quadratischem Querschnitt, dessen Seite = 5 cm, und auf die Mitte desselben eine dritte Schneide, welche sich beim Pressen gegen die Brücke anstemmt. Wird nun der Druck gesteigert, so hört man alsbald ein Knistern und Krachen, und mit wenig Mühe gelingt es, den starken Holzstab völlig durchzubrechen. (Fig. 2344.) Beträgt der Abstand der Schneiden 20 cm, so ist die zum Zerbrechen nötige Kraft 7500 kg. Ist nun das Verhältnis der Hebelarme = 50 : 8, das Verhältnis der Kolbenquerschnitte 44,6 : 1,1, so ist die aufzuwendende Kraft x bestimmt durch die Gleichung:

$$x \cdot \frac{50}{8} \cdot \frac{44,6}{1,1} = 7500, \text{ also } x = 39,5 \text{ kg}.$$

Fig. 2351.

135. Differentialkolbenmanometer. Die Messung großer Drucke von mehr als 1000 kg pro Quadratcentimeter kann mittels eines gewöhnlichen Manometers erfolgen bei Reduktion desselben nach dem Prinzip der hydraulischen Presse (Fig. 2351) durch zwei miteinander verbundene Kolben verschiedener Größe.

Hier könnte auch auf die Konstruktion der Wasserdruckverminderungsventile hingewiesen werden [2]).

136. Kraftübertragung und Energieaufspeicherung durch Druckwasser. Zur Demonstration benutze ich einen hydraulischen Akkumulator von der in Fig. 241 gezeichneten Form in Verbindung mit einer von der Transmission des Gasmotors aus getriebenen Speisepumpe, beide bezogen von der Maschinenfabrik vormals Klein, Becker und Schanzlin in Frankenthal. Der Akkumulator steht auf einem starken eisernen Wagen, die Gewichte sind zweiteilig, so daß sie vor dem Transport leicht abgenommen und nach demselben wieder aufgesetzt werden können [3]).

Bei dem hydraulischen Modell der Leidener Flasche von Lodge [4]) wird der Druck hervorgebracht durch eine elastisch gedehnte Kautschukblase, welche sich im

[1]) Dudgeon (Dingl. J. CXXXIII, 172) konstruierte eine kleine hydraulische Presse, die anstatt mit Wasser, mit Öl gefüllt wird und beständig gefüllt bleibt. Dieselbe hatte den Zweck, die gewöhnliche Wagenwinde zu ersetzen. Derartige Winden nach Fig. 2348 liefert Sonnenthal in Berlin. Auch bei den Demonstrationsmodellen empfiehlt es sich, das Wasser durch Öl zu ersetzen und dasselbe beständig in dem Apparate belassen. Hydraulische Pressen zur Bestimmung der Festigkeit von Zement, Steinen u. s. w. nach Fig. 2349 und 2350 liefert Franz Hugershoff in Leipzig, Karolinenstraße 13, zu bezw. 700 und 1500 Mk. Größere hydraulische Materialprüfungsmaschinen sind zu beziehen von Mohr u. Federhaff, Maschinenfabrik, Mannheim. — [2]) Wasserdruck-Verminderungsventile sind zu beziehen von Dreyer, Rosenkranz und Droop, Hannover. — [3]) Siehe auch oben (S. 128) unter Druckwasseranlage. — [4]) Lodge, Neueste Anschauungen über Elektrizität, Leipzig, Barth, 1896, S. 72, Fig. 12.

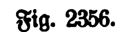


Fig. 2356.



Fig. 2357.



[illegible] am 6 m (= ² ₃ Atm.) läuft die [illegible] eine Nähmaschine [illegible] der Kolbenhub 30 mm. Bei [illegible] 100 Touren pro Minute [illegible] = 5 Pf. gerechnet, 60 Pf. [illegible]

[illegible] Wasserbehälter und dreht [illegible] man diese mit einer [illegible] wenn die erste ge-

nicht möglich wäre, die Energie direkt zu messen, könnten wir am Boden der Gefäße Federmanometer anbringen, welche den relativen Wert der potentiellen Energie beurteilen ließen, d. h. den Druck, obschon es ohne Kenntnis der Wassermenge nicht möglich wäre, den absoluten Wert zu bestimmen. Wäre das Gefäß A unendlich breit, so wäre die potentielle Energie $= 0$, schrumpft es nun zusammen, so daß die Höhe des Wasserstandes $= h$ wird, so ist die potentielle Energie, wenn Q die Wassermasse und g die Fallbeschleunigung, also $Q.g$ das Gewicht des Wassers

$$\frac{1}{2}\, Q.g.h \text{ Kilogrammmeter.}$$

Setzt man $g.h = E$, so wäre noch einfacher die Energie

$$\frac{1}{2}\, Q.E \text{ Kilogrammmeter,}$$

wobei dann E die Größe wäre, die das Federmanometer angeben kann, da dessen Angaben erstens proportional sind der Höhe der Wasseroberfläche über dem Boden, und zweitens der Intensität der Schwerkraft. Wird also das Federmanometer so graduiert, daß das Produkt $\frac{1}{2}\, Q.E$ in einem Falle wirklich die potentielle Energie in Kilogrammmetern angibt, so brauchten wir in jedem Falle nur das Produkt $\frac{1}{2}\, Q \times E$ (d. h. halbe Wassermenge $\times$ Angabe des Manometers) zu bilden, um sofort die vorhandene potentielle Energie ebenfalls richtig in Kilogrammmetern zu erhalten. Ähnlich bei Gebrauch absoluter Einheiten.

Ein analoger Ausdruck ergibt sich für die in einem Konduktor aufgespeicherte elektrische Energie.

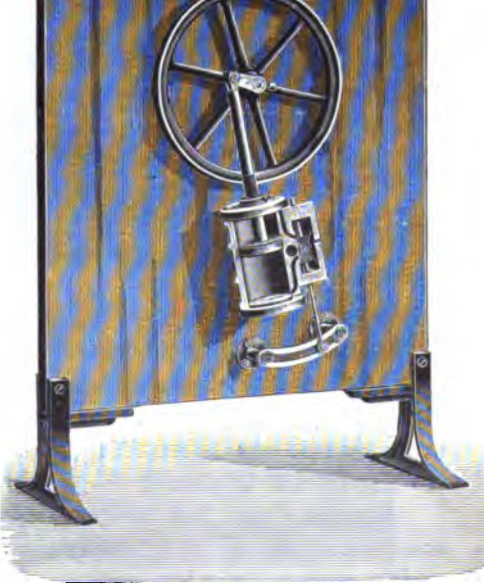
137. Wassermotoren. Verschiedene Schiebermodelle sind dargestellt in den Fig. 2354 (K, 40), 2355 (E, 95) und 2356 (Lb, 32).

Unter den verschiedenen Wasserdruckmotoren mit Cylinder und Kolben hat die größte Verbreitung der vom Ingenieur A. Schmid in Zürich konstruierte (Fig. 2357)

Fig. 2354.



Fig. 2355.



Der Apparat von Pascal. *ABC*, Fig. 2360, ist ein dreieckiges Brettchen mit Stellschrauben, auf welchem der metallene Cylinder *D*, Fig. 2361, steht, der wohl ausgeschliffen ist und einen metallenen, leicht beweglichen, aber wasserdicht schließenden Kolben[1]) *E* enthält, von solcher Dicke, daß er ganz unterhalb des Hahnes *F* Platz findet. Im Boden des Cylinders ist eine Öffnung für den Luftzutritt, weil sonst der Kolben nicht beweglich wäre. Der Kolben hat eine Hafte, um ihn mittels eines Drahtes an der einen Seite der gewöhnlichen Wage anzuhängen, während der Apparat auf dem Experimentiertische steht. Auf den Cylinder *D* können mittels der messingenen Fassungen *g*, *g*, *g* die gläsernen Gefäße *HH*, Fig. 2361, Fig. 2362 und Fig. 2363, von beliebig verschiedener Form,

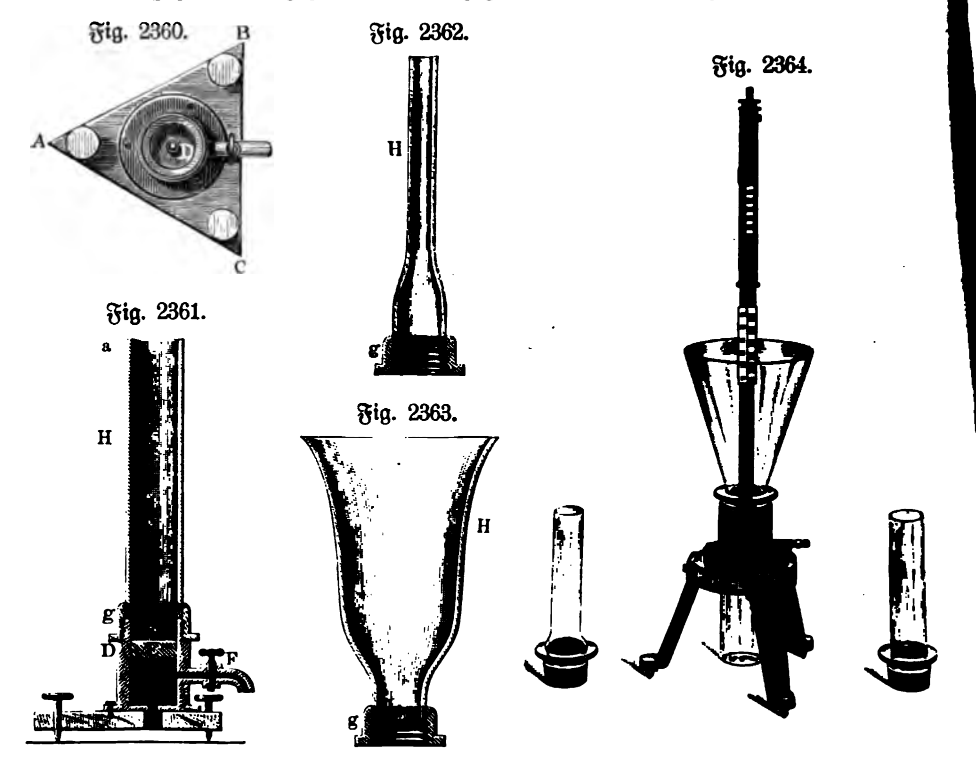


Fig. 2360. Fig. 2362. Fig. 2364. Fig. 2361. Fig. 2363.

aber nahezu gleicher Höhe, aufgeschraubt werden. Die vollkommen gleiche Höhe derselben über dem Standbrettchen wird an jedem durch einen Eichstrich bezeichnet, den man mittels irgend eines metallenen Scheibchens — einer an ein Holzfutter gekitteten Kupfermünze — und Schmirgels an jeder Drehbank aufschleifen oder mittels einer Feile und Terpentinöl einzeichnen kann.

Beim Gebrauche hängt man zuerst den herausgenommenen Kolben *E* an

---

[1]) Häufig wird einfach eine auf die Öffnung des Gefäßes aufgeschliffene Glasplatte benutzt (Fig. 2359 Lb, 120). Hartl (Z. 9, 118, 1896) und Höfler (Z. 16, 258, 1903) empfehlen statt der aufgeschliffenen Platte einen Kolben aus Ebonit, welcher sich in einem cylindrischen Ansatzrohr bewegen kann und am Umfange mit einer Nute versehen ist, in welche zum Zweck der Dichtung Quecksilber (20 g) eingefüllt wird. Diese zuerst von Steflitschek ersonnene Einrichtung ermöglicht fast reibungslose Bewegung des Kolbens bei vollkommener Abdichtung.

seinem Drahte frei an die Wage[1]), um denselben zu tarieren; er wird sodann zurückgebracht und das gleichweite Gefäß *H* aufgeschraubt, der Kolben wieder an die Wage gehängt und das Brettchen *ABC* senkrecht unter den betreffenden Haken derselben gestellt. Der Draht muß so lang sein, daß die Wage horizontal steht, wenn der Kolben sich über dem Hahn *F* befindet. Man füllt nun Wasser ein bis an den Eichstrich und legt in die andere Wagschale so viel Gewicht, als nötig ist, um die Wage im Gleichgewichte zu erhalten. Allenfalls kann man das Gewicht suchen, bei welchem der Kolben zu sinken anfängt und bei welchem er wieder steigt,

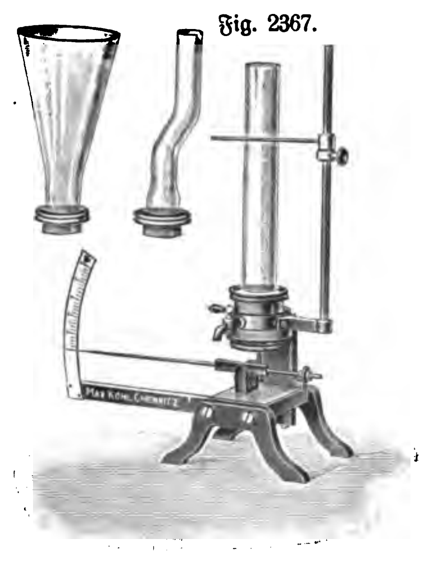
Fig. 2365.



Fig. 2366.



Fig. 2367.



um daraus das Mittel zu nehmen und die sehr geringe Reibung zu eliminieren. Der Kolben erhält kein Fett, er muß für sich schließen, und wenn dieses nicht ganz der Fall wäre, wenigstens kein Schweinefett, sondern Öl. Man hängt sodann den Draht aus, läßt den Kolben bis unter den Hahn *F* sinken und entfernt das Wasser durch *F*. Dasselbe Gewicht, welches für den gleichweiten Cylinder nötig war, wird auch dem Druck auf den Boden Gleichgewicht halten, wenn ein anderes beliebig geformtes Gefäß *H* aufgesetzt wird. Man kann auch so verfahren, daß man das erforderliche Gegengewicht aus dem Durchmesser des Bodens und dem bekannten Stande des Kolbens unter dem Eichstrich (wenn die Wage horizontal steht) im voraus berechnet. Ist das eine Gefäß von genau gleicher Weite wie der Cylinder,

[1]) **Zahlbruckner** benutzt statt der gewöhnlichen Wage eine Federwage (Fig. 2364 K, 95). Um den Zeiger der Wage nach erfolgter Belastung des Kolbens mit Quecksilber wieder auf den Nullpunkt zu bringen, hat man die oben am Apparat befindliche Regulierschraube zu drehen.

so kann man auch das darin befindliche Wasser in die Wagschale gießen, welche man nun an die Stelle des Kolbens anhängt, um zu zeigen, daß wirklich der Druck auf den Boden dem Gewichte der Wassermasse gleich ist, welche im gleichweiten Cylinder war. In diesem Falle muß man aber auch das Gewicht der anderen Wagschale, die man erst anhängt, um das Wasser einzugießen, sowie die Tara nicht übersehen. Vorher haben nämlich dem Wasser im Cylinder Gleichgewicht gehalten Wagschale und Gewicht; hängt man nun eine Wagschale an und gießt das Wasser hinein, so hat man auf dieser Seite um die Wagschale zu viel.

Eine andere sehr verbreitete Form des Pascalschen Apparates unterscheidet sich von der besprochenen dadurch, daß die Bodenplatte nicht an einem Draht hängt, sondern von unten durch einen Wagebalken gegen die Mündung angepreßt wird. (Fig. 2365 K, 60, Fig. 2366 K, 66, Fig. 2367 K, 50.)

Nach Krebs (1884) kann auch der hydrostatische Blasebalg dazu dienen, die Unabhängigkeit des Bodendrucks von der Form des Gefäßes zu demonstrieren. Er verwendet an Stelle des Blasebalges einfach eine durch Befeuchten geschmeidig gemachte Blase, welche 3 bis 4 cm herabhängt und durch eine Messingplatte am Ende eines Wagebalkens gegen die Bodenfläche des Gefäßes zurückgedrängt wird.

Handl (1885) empfiehlt folgende Vorrichtung:

„Ein cylindrischer, an der Seitenfläche blasebalgartig gefalteter Sack aus dünnem Kautschuk, ungefähr 7 cm hoch und 9 bis 10 cm im Durchmesser haltend, ist zwischen zwei kreisrunde Metallplatten eingekittet, deren obere einen 3 cm hohen und 0,8 cm weiten Ansatz trägt, in welchen ein Glasrohr wasserdicht eingesetzt werden kann. Dieses ist ungefähr 30 cm lang und an seinem oberen Ende mit einem Trichter versehen. Die obere Metallplatte dieser kleinen Vorrichtung wird von einem starken schweren Stativ gehalten, und zwar so, daß sie 3 bis 4 cm über der Ruhelage einer Wagschale steht, auf welche dann die untere Metallplatte zu liegen kommt.

Zunächst wird nun so viel Tara auf die Wage gebracht, als zur Herstellung des Gleichgewichtes erforderlich ist, so lange der Kautschuksack noch leer ist. Füllt man diesen hierauf mit irgend einer Flüssigkeit, so daß diese im Glasrohr die Höhe H über dem Metallboden des Apparates hat, so muß man zur Herstellung des Gleichgewichtes auf der anderen Seite der Wage das Gewicht $Q = FHS$ auflegen, wenn F die Größe der gedrückten Fläche, H die früher genannte Höhe und S das spezifische Gewicht der angewandten Flüssigkeit bedeutet. Da die Größe der Fläche F immer konstant bleibt, so ist Q dem Werte von H proportional und von der Menge (dem absoluten Gewichte) der vorhandenen Flüssigkeit unabhängig. Es ist leicht zu ersehen, daß dabei das Gleichgewicht an der Wage einen hohen Grad von Stabilität hat, welcher die Ausführung des Versuches sehr erleichtert, denn jede Hebung des Bodens des hydrostatischen Blasebalges vergrößert den Wert von H, weil ein Teil der Flüssigkeit aus dem breiteren Teile des Apparates in das engere Rohr getrieben wird und umgekehrt; jede Senkung der von der Flüssigkeit gedrückten Wagschale vermindert den Wert des hydrostatischen Druckes FHS.

Noch instruktiver wird der Versuch, wenn man das Glasrohr durch einen Kautschukschlauch ersetzt, an dessen anderem Ende Gefäße von verschiedenem Querschnitt angebracht werden, die in beliebigen Höhen festgestellt werden können. Es ist auf diese Weise sehr leicht und mit vollständiger Deutlichkeit nachzuweisen, daß der hydrostatische Druck nur von den Größen FHS und nicht auch von dem absoluten Gewichte der gebrauchten Flüssigkeitsmenge abhängig ist."

139. Quecksilbermanometer. Genauer als durch den S. 796 beschriebenen Manometerprüfungsapparat kann ein Federmanometer geeicht werden mittels eines Quecksilbermanometers (Fig. 2368 u. 2369), zu beziehen von Dreyer, Rosenkranz u. Droop, Hannover, und einer Druckpumpe.

Die Fig. 2370 und 2371 zeigen das Manometer von Desgoffe, bei welchem das oben S. 803 beschriebene Prinzip der miteinander verbundenen Kolben von ungleicher Größe Anwendung findet, wodurch es möglich ist, mit kurzen Quecksilbermanometern außerordentlich hohe Drucke zu messen.

140. Extraktionspresse. Fig. 2372. Um Pflanzensäfte zu extrahieren, muß das Wasser mit beträchtlichem Druck durch die zwischen zwei Drahtsieben im unteren Teile des Apparates eingezwängten Pflanzenteile, etwa Rosenblätter, Salbeiblätter u. s. w., welche eine Art Filter bilden, hindurchgepreßt werden. Der nötige Druck wird bei

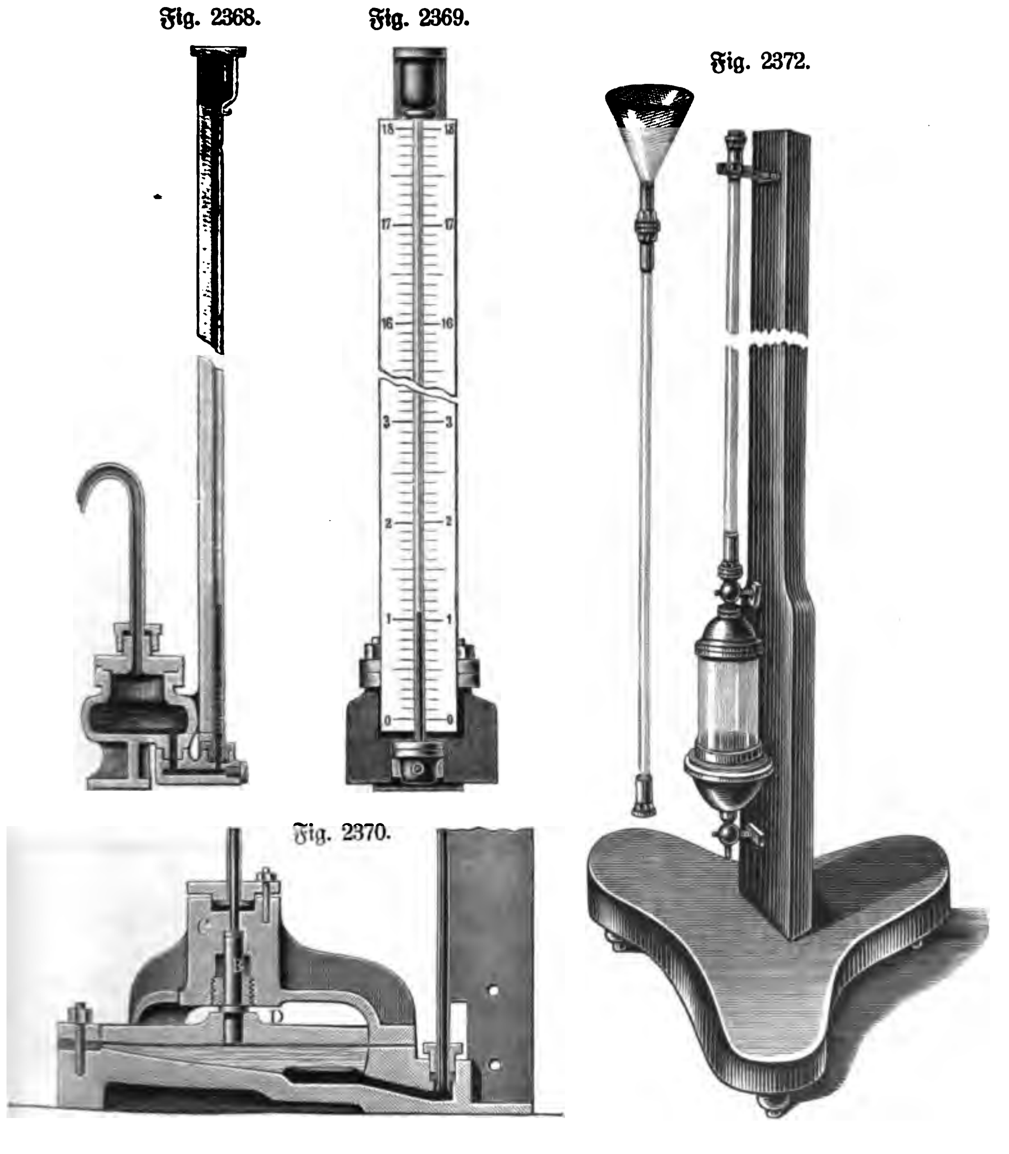


Fig. 2368. Fig. 2369.

Fig. 2372.

Fig. 2370.

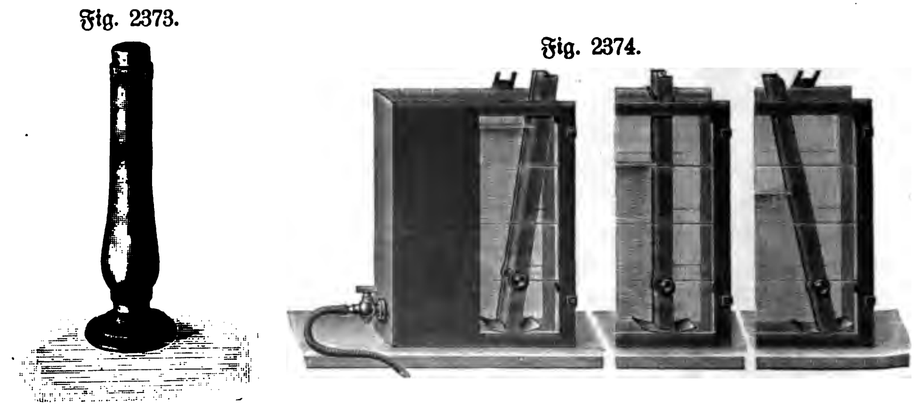
Fig. 2371.



Reals Presse dadurch erzeugt, daß man die enge Trichterröhre aufschraubt und durch den Trichter Wasser einfließen läßt. (Dr. Houdek u. Hervert, Prag, 22 fl.)

141. Seitendruck. Weinhold benutzt zur Demonstration einen cylindrischen Behälter aus Kautschuk, welcher mit Quecksilber gefüllt wird. Die Wandung baucht sich unten in der Nähe des Bodens durch den Druck des Quecksilbers am meisten

Fig. 2373. Fig. 2374.



aus (Fig. 2373 E, 8). Daß der Seitendruck im ersten Drittel der Höhe angreift, zeigt Höfler (Z. 16, 259, 1903) durch den Apparat Fig. 2374 [1]).

Zum Nachweis, daß der Druck unabhängig ist von der Neigung der gedrückten Fläche, verwendet Hartl (Z. 8, 204, 1895) den Apparat Fig. 2375 (E, 65).

Über die Berechnung des Druckmittelpunkts sei auf die Lehrbücher verwiesen.

[1]) Zu beziehen von W. J. Rohrbeck, Wien I, Kärntnerstraße 59.

142. Druck nach oben. Die auffallende Größe der Kraft bei großer Druckfläche zeige ich mittels eines Kautschuksackes, welcher zwischen zwei Brettern ähnlich wie in Fig. 2376 eingeklemmt ist, die durch ein darüber geschraubtes drittes Brett zusammengehalten werden. Letzteres wird beim Einfließen von Wasser durch die Röhre *ba* nach und nach mit großem Krachen zerbrochen. Es ist 0,62 m lang, 0,07 m breit und 0,018 m dick; somit die zum Zerbrechen nötige Kraft: 440 kg. Die Seiten des Kautschuksackes messen 0,5 und 0,62 m, somit genügt eine Druckhöhe von 1,5 m.



Fig. 2375.

Einen anderen einfachen Versuch hat Weinhold beschrieben. In eine Rindsblase ist ein kurzes Messingrohr eingebunden und dieses durch ein Kautschukrohr *a* mit dem Glasrohre *b* verbunden, welches durch irgend ein Stativ getragen wird. (Fig. 2376.) Die Blase kommt unter das Brett *A* und auf dieses ein Gewicht *B*, worauf man Wasser in *b* einfüllt, wodurch *A* gehoben wird.



Fig. 2376.

Nötigenfalls kann man auch die Blase geradezu auf einen Tisch und das Brett *A* darauf legen, da man dasselbe doch nicht hochsteigen läßt.

Die gewöhnliche Form des hydrostatischen Blasebalgs wurde schon oben S. 786 beschrieben. Warmbrunn, Quilitz u. Comp. versehen den hydraulischen Blasebalg mit vier Führungsstäben, was recht zweckmäßig erscheint.

Hartwich (Z. 16, 275, 1903) benutzt die in Fig. 2377 bis 2379 dargestellten einfachen Apparate (zu beziehen von Max Kohl in Chemnitz) um klar zu stellen, inwiefern der Satz vom Bodendruck in Übereinstimmung ist damit, daß eine Wage das richtige Gewicht der Flüssigkeit angibt. Dieselben bestehen aus leichten Blechgefäßen, deren cylindrischer Teil sich dicht anschließend an dem feststehenden massiven Cylinder verschieben kann. Füllt man die Gefäße mit Wasser, so sinkt das Gefäß 1 herunter, 2 bleibt stehen, 3 geht nach oben. Man hat also in letzterem Falle einen Druck nach oben, welcher, von dem Bodendruck in Abrechnung gebracht, das wirkliche Gewicht der Flüssigkeit gibt. Bei Fig. 2377 kommt noch der Druck auf die schrägen Wandungen hinzu.

Fig. 2377 bis 2379.

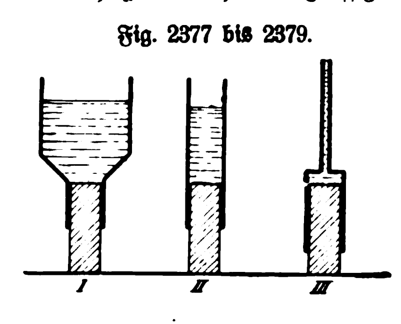


Fig. 2380.

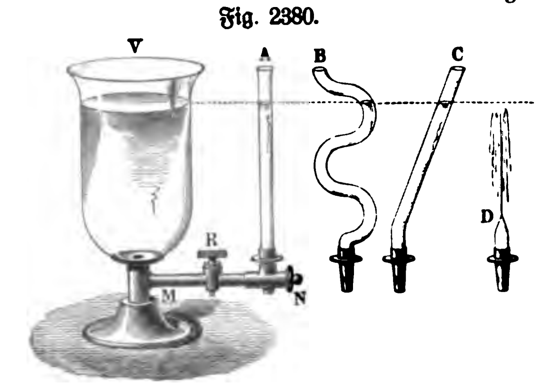


Fig. 2381.



143. Kommunizierende Gefäße. In einfachster Weise kann man verschiedene vertikal oder schief stehende Glasröhren durch ein beliebig verzweigtes System von engen Kautschukschläuchen verbinden.

Besonders schön zeigt sich das Gesetz in dem Apparate Fig. 2380 Lb, 25 deutlich und weithin sichtbar, wenn man gefärbtes Wasser und weißen Hintergrund anwendet.

Billig und doch ganz lehrreich sind die ganz aus Glas hergestellten Apparate, bei welchen auf einer horizontalen, an beiden Enden geschlossenen Röhre sehr verschiedenartig geformte, nach oben gerichtete Ansatzröhren angebracht sind (W, 3) oder von einem auf einem hölzernen Fuß befestigten Gefäße ein Seitenrohr mit vertikalen Einsatzröhren sich abzweigt (S, 4), Fig. 2381. Letzterer Apparat erscheint besonders darum zweckmäßig, weil er leicht von Hand zu Hand gereicht werden kann und analog konstruiert ist wie der später zu besprechende zur Demonstration der Kapillarität, so daß der Einfluß derselben besonders klar hervortritt.

Zur Färbung des Wassers empfiehlt Merkelbach (Z. 14, 294, 1901) Ketonblau 4 BN-Lösung (bezogen von den Farbwerken Meister, Lucius in Höchst a. M.).

Wronsky (1882) empfiehlt, in eine mit Wasser gefüllte Flasche von etwa 1 Liter Inhalt einen einerseits geschlossenen Kautschukschlauch von 95 cm Länge, 6 mm innerem Durchmesser und 2 mm Wandstärke einzusetzen, welcher am offenen Ende mit einem durch den Stöpsel der Flasche hindurchgeführten Glasrohr in Verbindung steht und mit dunkelgefärbtem Wasser gefüllt ist. Drückt man nun den Stöpsel kräftig ein, so sieht man das gefärbte Wasser in dem Glasrohr steigen. Würde man die Flüssigkeit in eine dünne Blase aus Kautschuk einfüllen und den Druck nicht durch Eintreiben des Stöpsels ausüben, sondern dadurch, daß man in den Stöpsel noch ein Trichterrohr einsetzt und in dieses Wasser einfüllt, so müßte das gefärbte Wasser, falls die Blase als gewichtlos und vollkommen biegsam betrachtet werden kann, ebenso hoch steigen wie das ungefärbte. Das Trichterrohr könnte auch zum Teil aus Kautschuk bestehen, so daß man durch Heben und Senken des Trichters den Druck variieren kann. Zum Vergleich könnte man die Flasche auch mit einem Steigrohr für das ungefärbte Wasser versehen.

Eine bekannte Anwendung des Gesetzes von den kommunizierenden Gefäßen ist der **Wasserstandsanzeiger**, welchen man z. B. an dem kleinen **Weinhold**schen Kessel[1]) (Fig. 2382) demonstrieren kann. Zu erwähnen wären auch die **Artesischen Brunnen**.

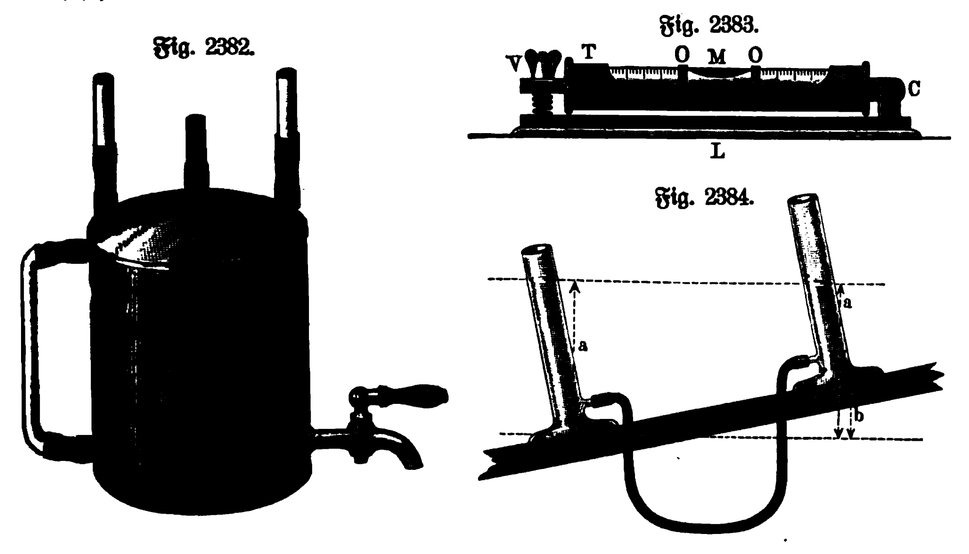


Fig. 2382. Fig. 2383. Fig. 2384.

144. Die Wasserwage oder Libelle. Eine Schlauchwasserwage, wie sie in der Technik, zum Horizontalrichten langer Wellen u. dergl. benutzt wird, kann man sich leicht selbst herstellen, indem man zwei gläserne Standgefäße mit seitlichem Tubulus in der Nähe des Fußes durch einen langen Kautschukschlauch verbindet. Wie weit man auch die beiden Gefäße voneinander entfernen mag, immer bleiben die beiden Oberflächen in einer horizontalen Linie, Fig. 2384. (**Korrespondierende Flüssigkeitshöhen.**)

Ein Modell einer gewöhnlichen Wasserwage zeigt Fig. 2385 (Lb, 250). Zweckmäßig wird man wenigstens die beiden Hauptformen dieses Instrumentes, die Röhrenlibelle, Fig. 2386 (E, 25) und die Dosenlibelle, Fig. 2387 (E, 5), vor-

[1]) Zu beziehen von G. **Lorenz**, Chemnitz, zu 14,5 Mk.

zeigen [1]). Hierher gehören auch Sphärometer und Kathetometer mit Wasserwage.

Fig. 2385.

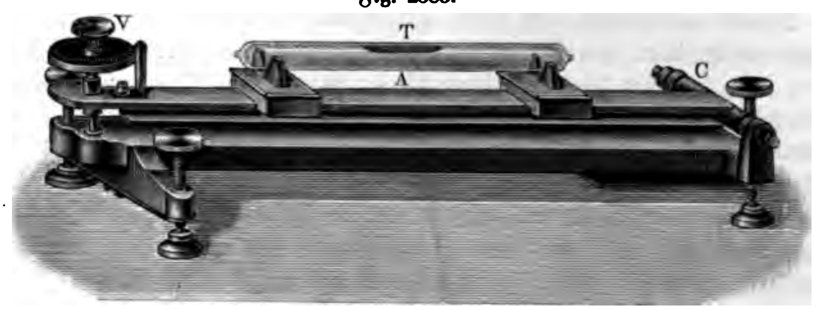


Fig. 2386.

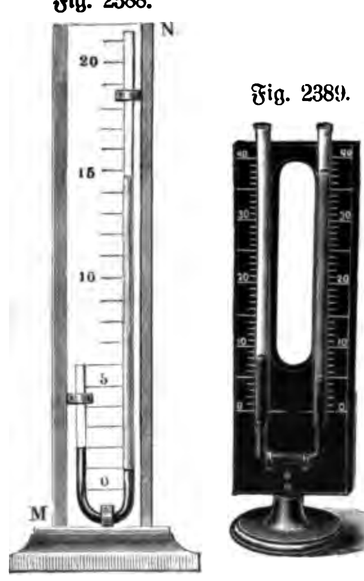


Fig 2387.



Fig. 2388.

Fig. 2389.



145. Hydrometer. Man kann hier zunächst darauf hinweisen, daß auch die gemeinschaftliche Grenze verschieden schwerer Flüssigkeiten, z. B. Wasser und Quecksilber im Falle des Gleichgewichts notwendig horizontal sein muß. Um das Gesetz der kommunizierenden Gefäße für ungleich schwere Flüssigkeiten — für Quecksilber und Wasser — zu zeigen, befestigt man auf einem mit Papier bezogenen Brettchen *MN*, Fig. 2388, eine gebogene, beiderseits offene, etwa 8 bis 10 mm weite Glasröhre, nachdem man eine für beide Schenkel gemeinschaftliche Teilung in Centimetern auf dasselbe aufgetragen hat. Zuerst kommt das Quecksilber in die Röhre, sodann durch einen feinen Trichter Wasser in den längeren Schenkel. Die Höhe, um welche nachher das Quecksilber in einem Schenkel höher steht als im anderen, verhält sich zur Höhe der Wassersäule umgekehrt wie die spezifischen Gewichte. (Fig. 2389 Lb, 18.)

Der Apparat von Halbat ist in Fig. 2390 abgebildet. In einem Kasten von Blech ist die gebogene Glasröhre *abc* befestigt, welche einerseits sich über den Kasten hinaus erhebt, anderseits in eine Fassung von Eisen endet, an der sich der Hahn *r* befindet; diese Röhre wird bis nahe zum Hahn mit Quecksilber gefüllt. Auf die

[1]) Sehr praktische Wasserwagen für technische Zwecke liefert in verschiedenster Ausführung J. F. Klingelfuß in Aarau (Schweiz). Fig. 2383 zeigt eine Ausführungsform mit Regulierschraube für die Fußplatte. Bei richtiger Regulierung müssen die Ausschläge beim Wenden um 180° gleich groß sein. (Eine Schlauchwasserwage ohne Schlauch kostet 21,60 bis 25,2 Mk.)

eiserne Fassung kann man nun das cylindrische Gefäß *d* anschrauben, dasselbe mit Wasser füllen, und durch die verschiebbare Marke *p* am anderen Schenkel bezeichnen, wie hoch durch den Druck des Wassers das Quecksilber gestiegen ist.

Entleert man das Wasser durch den Hahn *r* und schraubt statt des cylindrischen Gefäßes solche wie Fig. 2362 und Fig. 2363 auf, so wird das Quecksilber immer wieder bis *p* steigen, wenn man sie ebenso hoch mit Wasser füllt wie *d*. Da jedoch die Gefäße, welche an die Stelle von *d* geschraubt werden, nie hoch sind und man das Quecksilber in der kommunizierenden Röhre nur bis zur Seitenröhre reichen lassen darf, so ist es zweckmäßig, in den Schenkel *n* auf das Quecksilber ein paar Tropfen gefärbtes Wasser als Index zu gießen.

Fig. 2390.



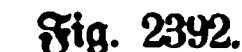

Fig. 2392.



Fig. 2391.



Zweckmäßiger sind diejenigen Formen dieses Apparates, bei welchen auch das Verbindungsstück der beiden Glasröhren sichtbar ist. Um die Höhe des Wassers in dem auszuwechselnden Gefäße bei diesen Apparaten richtig zu treffen, wird entweder ein vertikal verschiebbarer Stift (W, 45) oder ein horizontaler Zeiger angebracht (Fig. 2391 Lb, 50 u. 2392 Lb, 60).

Gießt man Quecksilber in einen etwas hohen Glascylinder, stellt eine beiderseits offene Glasröhre von solcher Weite hinein, daß die Wirkung der Kapillarität verschwindet und gießt dann auf das äußere Quecksilber Wasser, so muß das Quecksilber in der Röhre höher stehen.

Nach diesem Prinzip sind die Hydrometer mit konzentrischer Anordnung konstruiert. Es empfiehlt sich, den Versuch etwa unter Anwendung eines planparallelen Troges vor dem Projektionsapparat so zu variieren, daß man die Röhre schräg stellt (Analogie mit dem Barometer)[1]).

[1]) Über Hydrometer mit mikroskopischer Ablesung siehe Quincke, Z. 5, 115, 1892. Die Fehler sind um so größer, je enger die Röhren.

146. Wellenrohr. Von Maxwell wurde ein Apparat, ähnlich Fig. 239 zur Erläuterung der Rückstandsbildung gebraucht. Ein Wellenrohr aus Glas ist i der unteren Hälfte mit Quecksilber gefüllt, in der oberen mit Wasser. Die Tubu an den höchsten Punkten der Windungen, die entweder durch Hähne oder Stöpsel ve schlossen werden können, diene zum Einfüllen. Je zwei unte Bögen sind durch ein enge Röhrchen mit Hahn miteinande in Verbindung. Anfang un Ende des Rohres sind dur einen gleichfalls mit Wasse gefüllten Kautschukschlauch mi einander verbunden, der a einer Stelle durch eine Klemm aus zwei Walzen zusammen gedrückt wird. Wird die Klemme verschoben (der Konden sator geladen), so tritt in alle Windungen eine entsprechende Verschiebung der Queck silbersäulen ein, vorausgesetzt, daß die Hähne der Ver bindungsröhrchen geschlossen sind. Die Verschiebung (Ladung) wird wieder rückgängig, wenn die Klemme wieder zurück geschoben wird. Werden nun aber nach der Herstellung der Verschiebung die Verbindungshähnchen ganz wenig geöffnet, so daß das Quecksilber langsam durch dieselben durchsickern kann, so verschwindet allmählich die Verschiebung des Quecksilbers im Inneren (d. h. in den einzelnen Windungen) und entsprechend nimmt die herrschende Druckdifferenz (Potentialdifferenz) ab, die äußere Verschiebung dagegen (die Ladung) bleibt be stehen. Schiebt man nun, ohne die Stellung der Hähn chen zu ändern, die Klemme rasch wieder zurück, so daß die äußere Niveaudifferenz (Potentialdifferenz) für einen Moment verschwindet (entladet den Apparat), und hält die Klemme an der betreffenden Stelle fest (d. h. läßt man die Ladung ungeändert, stellt den Apparat isoliert auf), so stellt sich allmählich in dem Maße, als das Quecksilber wieder durch die Verbindungsröhrchen zurück sickert, ein neuer Druckunterschied (Potentialdifferenz) her und man muß, um denselben zu beseitigen, die Klemme abermals verschieben (den Kondensator abermals entladen), worauf sich dann der Vorgang in geringerem Maße wiederholt u. s. w., bis die gesamte ursprüngliche Verschiebung wieder rück gängig gemacht worden (die ganze anfängliche Ladung verschwunden) ist. Der Be trag an Verschiebung (Ladung), der nach jeder Entladung noch übrig ist, heißt Rückstand oder Residuum.

Fig. 2393.

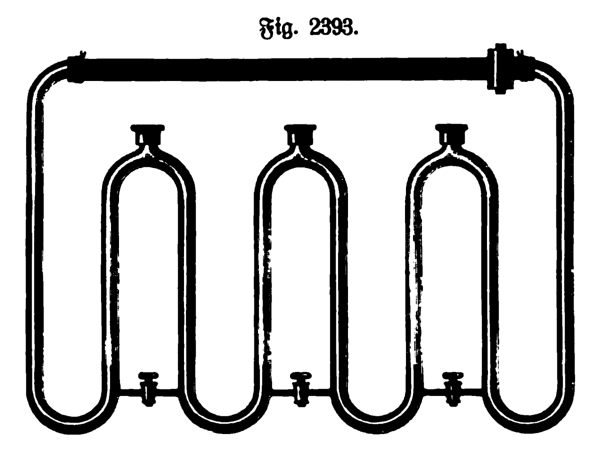


Fig. 2394.

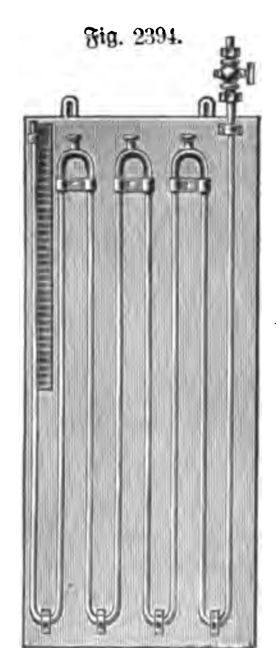


Fig. 2394 zeigt ein als abgekürztes Manometer zu gebrauchendes Wellen rohr, wie es von Leybolds Nachf. in Köln geliefert wird (Preis 60 Mk).

147. Der Aufdruck des Wassers. Zu diesem Versuche kann man jedes etwas weite Lampenkamin verwenden, gleichviel ob es gekröpft ist oder nicht. Man schleift seinen unteren Rand auf einer Glasplatte mit Goldsand und zuletzt mit geschlämmtem Schmirgel eben. Als Bodenplatte kann man ein Stück Spiegelglas nehmen, welches man vom Glaser in der erforderlichen Größe rund schneiden läßt und dann auf einem anderen Spiegelglas mit feinem Schmirgel matt schleift; ein Faden wird mit Siegellack angekittet. Eine gläserne Bodenplatte hat aber den Nachteil, daß man den Faden leicht losreißt; man macht daher dieselbe lieber von Messing. Eine zugerundete Messingplatte wird auf der Drehbank mit Siegellack konzentrisch an ein Stück Holz gekittet, rund und eben gedreht und dann noch eben geschliffen, wobei das Futter, in welchem das Holz steckt, als Handhabe dient. Ist dieses geschehen, so bohrt man in die Mitte ein Loch, versieht es mit einem Gewinde und richtet einen Haken hinein. Allenfalls kann man den Haken, statt ihn einzuschrauben, nach dem Herunternehmen der Platte auf deren Rückseite vernieten. Will man aber saubere Arbeit, so kittet man die Platte nun noch einmal mit der geschliffenen Seite auf, dreht auch die Rückseite ab und firnißt sie sodann auf der Drehbank mit Schellack. (W, 2,50.)

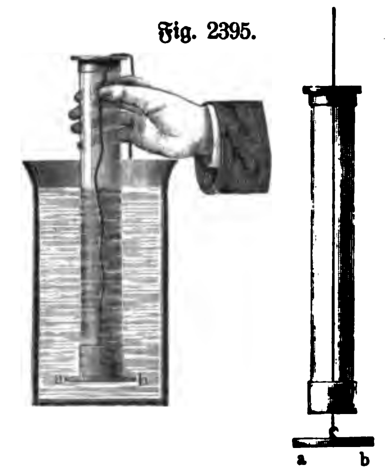


Fig. 2395.

Will man den Apparat dauerhaft und schöner haben, so kittet man an die Glasröhre Fassungen von Messing und schleift die eine davon, welche dann etwa 5 mm dick genommen wird, eben. Fig. 2395 zeigt den Apparat in dieser Form und zugleich die Anstellung des Versuches.

Bei dem Versuche wird kein Fett zwischen die Bodenplatte und den Rand der Glasröhre gebracht, weil sonst die Platte bei allmählichem Herausheben der Glasröhre aus dem Wasser nicht von dieser wegfallen würde, ebensowenig wenn man Wasser eingießt, um dieses zu bewirken, es sei denn, man wende in letzterem Falle einen Überdruck an, d. h. man stelle das Wasser in der Röhre höher als außerhalb derselben.

Effektvoller wird der Versuch, wenn man statt des engen Cylinders einen etwa 1 dcm weiten und mehrere Decimeter hohen starkwandigen Cylinder und als Platte eine dünne geschliffene Glasscheibe ohne Faden nimmt. Man kann dann eine ganze Kanne voll (am besten gefärbtes) Wasser eingießen, ohne daß die Glasplatte herunterfällt. Dies geschieht erst, wenn außen und innen gleiches Niveau erreicht ist.

148. Gewichtsverlust untergetauchter Körper. Zur Demonstration dieses Satzes bedient man sich des in Fig. 2396 abgebildeten Apparates. Er besteht im wesentlichen aus einem hohlen Cylinder *c*, der oberhalb an einem Bügel aufgehängt werden kann und unterhalb ein Häkchen hat, und dem massiven oder doch überall verschlossenen Cylinder *p*, der mittels eines Fadens an *c* gehängt wird; *p* muß gerade die Höhlung von *c* ausfüllen. Die beiden Cylinder werden nun an der Seite einer gewöhnlichen Wage (von so viel Empfindlichkeit als die Wagen des Kaufmanns) nach Entfernung der einen Wagschale aufgehängt und es wird durch zugelegte Gewichte das Gleichgewicht hergestellt. Setzt man sodann ein Glas Wasser

52*

unter, so daß p in dieses untertauchen muß, so wird das Gleichgewicht gestört und tritt erst wieder ein, wenn c eben voll Wasser gemacht wird; eben voll bringt man es am besten dadurch, daß man mit Fließpapier das überflüssige Wasser aufsaugt. Die beiden Gefäße können vom Blechner gemacht werden, ihre Ränder müssen aber scharf aneinander gelötet sein und nicht übereinander gehen. Besser werden

Fig. 2396.

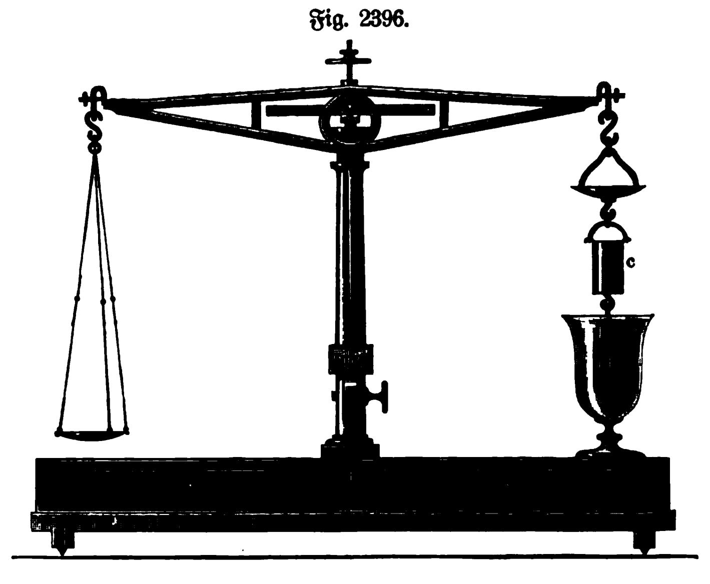


Fig. 2397.



sie freilich, wenn sie aus Zinn oder Messing gemacht und abgedreht werden, wo man dann p genau in c einpassen kann.

Emsmann (1885) empfiehlt, die Experimente über den Gewichtsverlust eingetauchter Körper recht eingehend und mit möglichst primitiven Apparaten auszuführen, damit sie von den Schülern leicht wiederholt werden können, wodurch deren Interesse daher lebhaft angeregt wird. Ein Medizinfläschchen, welches so leicht ist, daß es leer auf dem Wasser schwimmt, wird mit Schrot oder Sand so weit gefüllt, daß es untersinken würde, und die Öffnung verschlossen. Nun hängt man dasselbe mittels eines Pferdehaares an eine Wage, wiegt erst in Luft, dann in Wasser und

erhält so den Gewichtsverlust oder Auftrieb. Nun gibt man mehr und mehr Schrot in das Fläschchen und bestimmt wieder den Auftrieb. Es zeigt sich, der Gewichtsverlust ist ganz unabhängig von dem absoluten Gewicht des Körpers. (Mit einer zweiten größeren oder kleineren Flasche kann man ebenso nachweisen, daß er vom Volumen abhängt.) Nun bringt man die Flasche in ein bis zum Rande gefülltes Glas Wasser. Das Wasser läuft über. Man stellt das Glas auf die Wage und tariert, gießt alsdann wieder bis zum Rande voll und gibt Gewichte auf, bis Gleichgewicht eingetreten ist. Es zeigt sich, die zugegossene, d. h. zuerst verdrängte Wassermenge wiegt ebensoviel, als bei dem vorigen Experiment der Auftrieb betrug. Beschwert man das Fläschchen soweit, daß sein Gewicht gerade gleich dem Auftriebe ist, so zeigt sich, daß es im Wasser untergetaucht schwimmt.

Man kann auch das verdrängte Wasser nach Fig. 2397 (Lb 58 bis 140) mittelst eines Maßcylinders messen.

Hieran schließt sich Doves Versuch. Man stelle sich ein solches Fläschchen her, welches eben im Wasser (völlig untergetaucht) schwimmt. Man fülle ferner ein Glas bis zum Rande mit Wasser und bringe es auf einer Wage ins Gleichgewicht. Bringt man nun das Fläschen hinein, wobei eine entsprechende Menge Wasser überläuft, und setzt das Gefäß wieder auf die Wage, so erweist sich das Gleichgewicht ungestört. Das Fläschchen wiegt also ebensoviel als das verdrängte Wasser.

Fig. 2398.



Einen anderen sehr instruktiven Versuch kann man mit dem Apparate (Fig. 2396) auf folgende Art anstellen. Auf der einen Wagschale wird ein mit Wasser nicht ganz gefülltes Glas tariert, während an der anderen Wagschale oder ihrem Haken das Gefäß *c* aufgehängt ist; hängt man nun den Cylinder *p* an einem Faden, den man mit der Hand hält oder an dem Querarm irgend eines Stativs befestigt, frei in das Wasser, so wird das Gleichgewicht erst wieder hergestellt, wenn der Cylinder *c* eben mit Wasser gefüllt wird; doch muß *p* hierfür massiv sein, weil er sonst vielleicht nicht untertauchen würde. Hängt man aber den Körper nicht an einem isolierten Stativ, sondern an der das Wassergefäß tragenden Wagschale auf (Fig. 2398), so tritt beim Eintauchen des Körpers keine Änderung ein.

Ein besonderer Apparat zur Demonstration der gleichen Erscheinung ist von Sire (1874) angegeben. Auf die eine Schale einer sogenannten Tafelwage ist ein Gefäß mit Wasser gestellt, welches bis zu der seitlichen Ausflußröhre mit Wasser gefüllt ist. Auf der anderen Wagschale befindet sich ein Stativ mit langem Querarm, an welchem mittels eines Pferdehaares oder feinen Drahtes der einzutauchende Körper befestigt ist. Außerdem trägt dieses Stativ ein kleines Becherglas, welches sich gerade unter der Mündung des Ausflußrohres des größeren Gefäßes befindet. Man läßt zunächst den Körper nicht eintauchen und bringt die Wage ins Gleichgewicht. Nun schiebt man den Arm des Stativs herunter, bis der Körper eintaucht, wobei dann eine entsprechende Quantität Wasser in das Becherglas überfließt. Gibt man die Wage wieder frei, so erweist sich, daß das Gleichgewicht nicht im mindesten gestört ist, obgleich sich nun links weniger Wasser und rechts mehr befindet als zuvor. (Fig. 2399 K, 50.)

Man trifft nicht selten Leute, die mit den verschiedensten Dingen im Gebiete

der Physik recht wohl Bescheid wissen, aber gerade in bezug auf diese einfache, nur ungewohnte Erscheinung des Auftriebs ganz im unklaren sind und darauf schwören würden, daß das Gleichgewicht einer Wage nicht gestört wird, wenn man, ohne die Gefäßwände zu berühren, einen Finger in das Wasser des auf der einen Wagschale befindlichen Gefäßes eintaucht, und doch ist die scheinbare Gewichtszunahme des Wassers so beträchtlich, daß man dieselbe schon wahrnehmen kann, wenn man an einem biegsamen Baumaste einen wassergefüllten Eimer aufhängt und in diesen die Hand eintaucht.

Fig. 2399.

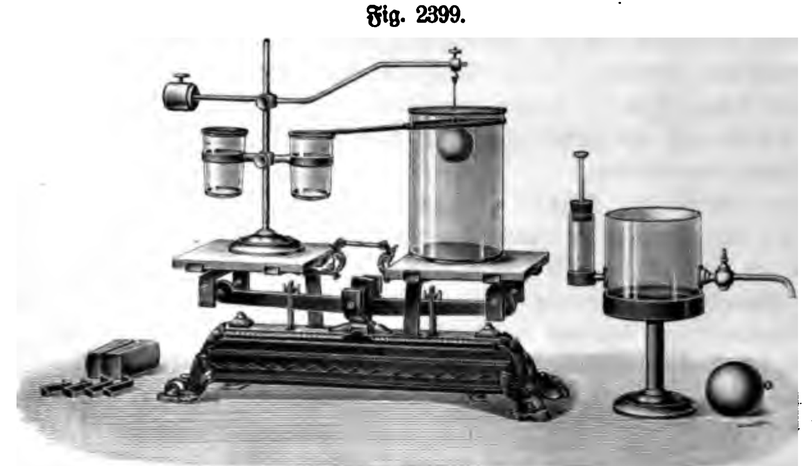
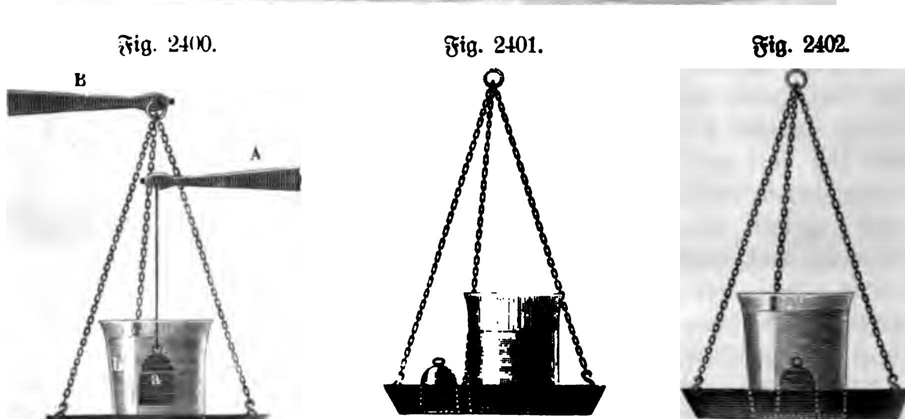


Fig. 2400. Fig. 2401. Fig. 2402.



Bereits Simon Stevin (1634) macht auf die Tatsache aufmerksam, daß, wenn man in ein cylindrisches Gefäß, das an dem einen Arme eines Wagebalkens hängt, einen cylindrischen Holzkörper einsenkt, der an einem Stativ außerhalb befestigt wird, und nun den Zwischenraum mit Wasser füllt, das Gewicht dieses Wassers scheinbar ebenso groß ist, als wenn an Stelle des eingetauchten Teils sich Wasser befände, wie man leicht zeigen kann, wenn man nunmehr den Holzkörper entfernt und das Gefäß bis zu gleicher Höhe, die man sich zuvor markiert hat, ganz mit Wasser anfüllt. Neuerdings hat Poske (1885) wieder auf diesen einfachen und lehrreichen Versuch aufmerksam gemacht.

Hat man bei dem Versuche Fig. 2400 den Körper *a* vor dem Eintauchen an der Wage *A* ins Gleichgewicht gebracht und ebenso das Gefäß *b* an der Wage *B*,

so muß man nach dem Eintauchen das Gewicht des verdrängten Wassers aus der anderen Wagschale von A entfernen und dasselbe in die andere Wagschale von B legen, wenn wieder Gleichgewicht hergestellt werden soll.

Auch Stolzenburg (1885) betont nochmals, daß es nützlich sei, darauf hinzuweisen, daß der scheinbaren Gewichtsabnahme des Körpers eine genau gleiche scheinbare Gewichtszunahme des Wassers entspricht, in welches der Körper eingetaucht wird, da andernfalls die Schüler sehr leicht darüber im Unklaren bleiben können, wie denn der Gewichtsverlust in Einklang zu bringen ist mit dem Gesetze von der Unveränderlichkeit des Gewichtes, da ja bei dem Eintauchen keiner der angewandten Stoffe verloren geht.

Man kann die Gelegenheit benutzen, um auf das sogenannte dritte Prinzip der Mechanik (§ 19, S. 667) zurück zu kommen, daß stets Wirkung und Gegenwirkung einander gleich sind. Ein eingetauchter Finger erfährt einen Druck nach oben, das Wasser einen ebenso starken Druck nach unten.

Ein anderer zu berichtigender Irrtum ist der, daß die scheinbare Zunahme des Wassergewichtes einer entsprechenden Zunahme des Bodendruckes (allein) entspräche. Man hat nur nötig, beim Pascalschen Apparate einmal bei Anwendung eines weiten, dann eines engen Gefäßes ein und denselben Holzkörper einzutauchen, um zu konstatieren, daß in beiden Fällen der Bodendruck entsprechend der verschiedenen Höhe der Flüssigkeit infolge des Eintauchens des Holzkörpers verschieden ausfällt. Berücksichtigt man aber die vertikalen Komponenten des Flüssigkeitsdruckes auf sämtliche Gefäßwände, so ergibt sich, daß in der Tat die algebraische Summe derselben gleich der scheinbaren Zunahme des Wassergewichtes ist.

Bekannt ist auch die irreleitende Frage: Zeigt eine Wage dasselbe Gewicht an, wenn man auf die eine Wagschale ein Glas mit Wasser und daneben einen Fisch legt oder wenn man den Fisch nicht daneben, sondern in das Glas mit Wasser legt, wo er also nach der üblichen einseitigen Auffassung einen Gewichtsverlust erleidet.

Es ist unglaublich, wie oft früher diese einfache Frage diskutiert wurde und wie viel Kopfzerbrechen dieselbe veranlaßt hat.

Zur Erläuterung können die in Fig. 2401 und 2402 dargestellten Versuche gemacht werden; in beiden Fällen bleibt das in der anderen Wagschale befindliche Gewicht unverändert.

149. Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester Körper. a) Mit der Wage. Bindet man den Körper an, um ihn an dem Häkchen der kürzeren Wagschale in das Wasser zu hängen, so nimmt man hierzu möglichst feinen Draht oder, wenn es das Gewicht des Körpers erlaubt, ein mit Lauge entfettetes Menschenhaar. In jedem Falle muß das Gewicht des Haares oder Drahtes tariert werden. Ein unvermeidlicher Fehler dieser Methode besteht darin, daß der Gewichtsverlust des Haares im Wasser dem zu wägenden Körper angerechnet wird.

Hat die Wage keine kürzere Wagschale, so stellt man das Wassergefäß auf eine über die Wagschale gesetzte Brücke und hängt den Körper an dem oberen Haken der Wagschale auf.

Bei größeren Massen von weicher Konsistenz nimmt man eine Schale von Blech an möglichst dünnen Fäden, deren absolutes $= p$ und spezifisches Gewicht $= s$ vorher für sich bestimmt wird. Ist dann das absolute Gewicht des Körpers p',

so ist sein spezifisches $= \frac{sp'}{ns - p'}$, wenn n der Gewichtsverlust des ganzen Systems ist.

Eine Modifikation des Versuchs besteht darin, daß man ein Gefäß mit Wasser auf die Wage stellt und die scheinbare Gewichtszunahme beim Eintauchen des an einem Stativ aufgehängten Körpers bestimmt.

Körper, welche leichter sind als Wasser, werden mit schwereren verbunden, deren absolutes und spezifisches Gewicht ebenfalls voraus bestimmt wurde; die Rechnung ist dieselbe, d. h. man zieht den bekannten Gewichtsverlust des schwereren Körpers vom gefundenen Gewichtsverlust des ganzen Systems ab, um den Gewichtsverlust des zu bestimmenden Körpers zu erhalten.

b) Mit der Federwage. Unter die für gewöhnliche Wägungen bestimmte gewöhnlich aus Messingblech verfertigte kleine Wagschale wird eine an drei feinen Platindrähten befestigte gläserne Wagschale angehängt und in ein Glas mit Wasser, welches auf ein eigens dazu bestimmtes Brettchen aufgestellt wird, eingesenkt bis zum Verbindungspunkte der drei Platindrähte des Glasschälchens. Man legt den Körper zunächst auf das Messingschälchen, verschiebt das Tischchen mit dem Wasserglas, bis die Wasseroberfläche wieder an dem eben genannten Punkte steht und erhält so in der Verlängerung der Spirale das Gewicht des Körpers in Luft, da die Verlängerung, welche 1 g bewirkt, durch Vorversuche bekannt ist (Fig. 2066, S. 663).

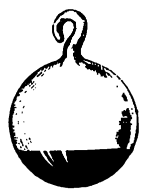
Nun legt man den Körper auf das Glasschälchen und erhält in gleicher Weise das Gewicht des Körpers in Wasser. Die Vorrichtung ist recht bequem und wegen Beseitigung aller Komplikationen auch recht instruktiv, doch sind die Resultate wegen der Kapillarwirkungen auf den Platindraht bei der relativ geringen Größe der zu wägenden Körper bei weitem nicht so zuverlässig wie die mit der gewöhnlichen Wage erhaltenen.

150. Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Flüssigkeiten. Man wiegt einen in der Flüssigkeit nicht auflöslichen Körper in dieser und in Wasser ab. Am besten eignet sich hierzu ein massives Glasstück oder auch eine hohle Glaskugel von etwa 3 cm Durchmesser, Fig. 2403, die man vor dem Zuschmelzen mit etwas Quecksilber beschwert hat; an der Kugel kann man einen Haken umbiegen; statt der Kugel kann man eine ebenso zugerichtete, etwa 5 bis 6 cm weite Glasröhre anwenden, wie Fig. 2404. Zum Aufhängen nimmt man Platindraht, um auch Säuren bestimmen zu können. Man kann nun das Gewicht der Kugel in der Luft und ihren Gewichtsverlust in Wasser für eine bestimmte Temperatur suchen und diese Notiz dem Apparate beilegen, so daß man für jede zu bestimmende Flüssigkeit nur eine Wägung zu machen hat. Sehr bequem ist es, wenn man zugleich ein Stück Blei richtet, welches die Kugel in der Luft gerade tariert; ist dieselbe dann in eine Flüssigkeit eingetaucht, so gibt das auf die kürzere Wagschale zuzulegende Gewicht unmittelbar den Gewichtsverlust an. Man muß natürlich dafür sorgen, daß keine Luftbläschen an dem einzutauchenden Glasstücke hängen bleiben. Sorgfältige Reinigung des einzutauchenden Körpers, nötigenfalls mit Wein-

Fig. 2404.



Fig. 2403.



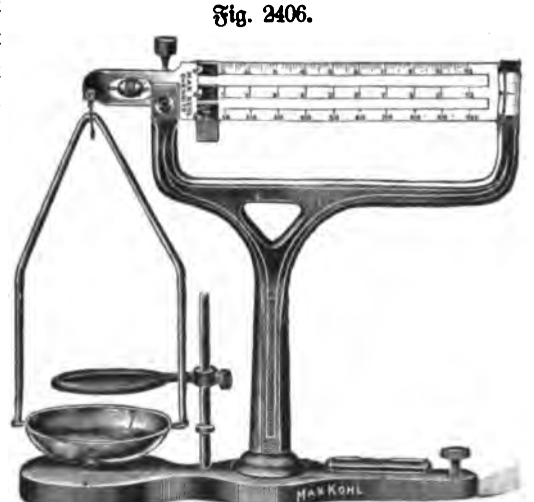
geist, und vorheriges Benetzen desselben in einer anderen Portion Flüssigkeit führen in dieser Beziehung am sichersten zum Ziele[1]).

Eine sehr bequeme Vereinfachung der Methode wurde durch Fr. Mohr eingeführt und durch Westphal (Mechaniker in Celle) noch verbessert (Fig. 2405 Lb, 27 bis 55). Die Wage ist auf sehr geringe Dimensionen reduziert, die Wagschalen fehlen ganz, da an einem Ende nur der Senkkörper an einem feinen Platindraht angebracht ist, an dem anderen ein Gewicht, welches ersteren gerade äquilibriert. Der Zeiger (die Zunge) ist ebenfalls unnötig, da der das Gewicht tragende Arm des Wagebalkens selbst als Zeiger dient. Taucht der Senkkörper in eine zu untersuchende Flüssigkeit ein, so muß an den gleichen Arm ein Gewicht angehängt werden, welches den Auftrieb kompensiert. Dieses Gewicht ist so groß, daß es gerade den Auftrieb im Wasser kompensieren würde; ist die Flüssigkeit also spezifisch leichter, somit der Auftrieb geringer, so muß das Gewicht nicht an das Ende des Wagebalkens angehängt werden, sondern an einen bestimmten Bruchteil desselben, dessen Größe direkt das spezifische Gewicht gibt. Da die zweite und dritte Decimale nicht mehr genau und bequem auf diesem Wege gefunden werden können, so ist noch ein Gewicht = $1/10$ und eines = $1/100$ des vorigen beigegeben. Man setzt diese drei Ge-

Fig. 2405.



Fig. 2406.



wichte gleichzeitig so auf, daß Gleichgewicht eintritt und zwar auf ganze Zehntel des Wagebalkens. Dann gibt das große Gewicht bezw. die Länge des Hebelarmes, an welchem es zieht, die erste Decimale des spezifischen Gewichts, die beiden anderen die zweite und dritte. Ist eine Flüssigkeit von größerem spezifischen Gewicht als Wasser zu untersuchen, so wird noch ein Gewicht, dessen Wert gleich dem größten, an das Ende des Wagebalkens angehängt und entsprechend das spezifische Gewicht nicht 0, ... sondern 1, ... geschrieben.

Noch bequemer ist die hydrostatische Zeigerwage von v. Bezold (1880), zu beziehen von der Firma Böhm u. Wiedemann in München (40 Mk.). Die Ein-

[1]) Fig. 2406 K, 60 zeigt eine hydrostatische Schnellwage mit drei Schubgewichten und dreifacher Skala, für 111 g Belastung. Dieselbe besitzt eine Empfindlichkeit von 0,005 g und gestattet ein schnelles Wägen durch die mit Index versehenen Gewichte auf den zugehörigen Skalen. Das unterste Gewicht gibt die ganzen Gramme, das mittlere Gewicht die Zehntel und das oberste Gewicht die Hundertstel an. Die Gewichte können nicht von den Schienen herabfallen, wodurch ein Verlieren ausgeschlossen ist. Das Tischchen für hydrostatische Versuche ist an der Säule verstellbar.

richtung ist diejenige einer Briefwage, so daß der Zeiger nach Herstellung des Gleichgewichts unmittelbar auf einer Skala das spezifische Gewicht der Flüssigkeit angibt.

151. Schwimmen. Zur Demonstration des Satzes, daß jeder Körper so tief einsinkt, bis die verdrängte Flüssigkeit so viel wiegt als der ganze Körper, nimmt man ein Blechgefäß von 6 bis 10 cm Weite, das oben eine seitliche Ausflußröhre hat, und füllt es mit Wasser, bis das übrige Wasser abläuft. Statt des Blechgefäßes kann man auch einen Glascylinder nehmen, ihn mit einem seitlichen Loche versehen und in dieses eine Glasröhre einkitten, Fig. 2407. Ist alles überflüssige Wasser abgeflossen, so setzt man einen etwas voluminösen Körper, der im Wasser schwimmt, in das Gefäß und fängt das nun abfließende Wasser entweder in einer Wagschale oder in einem graduierten Cylinder auf, um zu zeigen, daß das Gewicht derselben dem vorher bestimmten Gewichte des eingetauchten Körpers gleich ist. Als schwimmender Körper ist eine etwas tiefe Glasschale, wie man sie aus einer Retorte erhalten kann, sehr zweckmäßig; man beschwert sie anfänglich mit Schrot, damit sie etwas tiefer einsinkt und aufrecht schwimmt. So oft man dann nachher Gewichtsstücke nachlegt, fließt immer wieder die entsprechende Menge Wasser ab.

Fig. 2407.



Einfacher stellt man das Gefäß auf die Wage und tariert es vor dem Einsenken des Körpers. Wird nun der Körper eingebracht, so ist vorläufig das Gleichgewicht gestört, es tritt aber alsbald wieder ein, wenn der Ausfluß des verdrängten Wassers beendet ist.

Von Interesse ist das Schwimmen einer Eisenkugel auf einer größeren Menge Quecksilber. Ich verwende hierzu ein eisernes 10 Kilogrammgewicht.

152. Senkwage. Fängt man bei dem Versuche Fig. 2407 das Wasser in einem Maßcylinder auf (wie bei Fig. 2397), so ist die gemessene Anzahl Cubikcentimeter gleich dem Gewicht des Körpers in Grammen, man hat also in der Vorrichtung zugleich eine eigentümliche Wage.

Einfacher benutzt man einen prismatischen, unten mit Blei beschwerten, oben in eine Wagschale auslaufenden und seitlich mit einer Cubikcentimeterteilung versehenen Schwimmkörper, welcher für sich bis zum Nullpunkt der Teilung einsinkt. Legt man nun irgend ein Gewichtstück auf, so gibt der Teilstrich, bis zu welchem er nun einsinkt, direkt die Anzahl Gramme an. Der von mir benutzte Schwimmkörper hat acht Teile, welche einem Volumen von 2 cdm entsprechen. Senkung um einen Teilstrich bedeutet also Belastung um $^1/_4$ kg.

Bei Nicholsons Senkwage (Fig. 2408) werden zuerst Gewichte aufgelegt bis zum Eintauchen an die Marke *c*, sodann der zu wägende Körper und wieder Gewichte bis zu gleich tiefem Eintauchen. Die Wage besitzt auch unten eine (siebförmige) Wagschale, um zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes die Körper in Wasser wägen zu können.

Es ist sehr zweckmäßig, wenn das Sieb auch verkehrt angehängt werden kann, was bei der in Fig. 2408 dargestellten Form möglich ist, damit man Körper, die

leichter sind als Wasser, darunter bringen kann. Gewöhnlich wird die Senkwage von dünnem Messingblech gemacht, wobei darauf zu sehen ist, daß der Körper desselben bei *a* konisch wird, denn sonst findet bei einigem Übergewicht ein zu plötzliches Einsinken statt. Wenn das Instrument einmal bis an das Schälchen *b* eingesunken, dieses also naß geworden ist, so muß es abgetrocknet werden; um sich diese Mühe zu ersparen, sowie um das Anhängen des Instrumentes an die Wände des Glases zu verhindern, legt man auf den Rand des letzteren und unter dem Schälchen *b* durch einen gabelförmig gebogenen Draht Fig. 2409.

Von der Feinheit des Stiftes *c* hängt die Empfindlichkeit des Instrumentes ab; um denselben daher möglichst dünn nehmen zu können, wird er aus hart gezogenem Messingdrahte gemacht, in den Körper des Instrumentes eingeschraubt und nur der luftdichten Verschließung wegen mit leichtflüssigem Lote eingelötet. Die Marke in der Mitte des Stiftes besteht aus einem ringsum laufenden feinen Feilstrich.

Körper, Schälchen und Sieb werden gleich weit gemacht, um sie in demselben Futteral aus Pappe verwahren zu können. Sieb und Kugel kommen dabei in eine besondere Abteilung. Man muß die Verhältnisse nach der Dicke des Messingblechs so wählen, daß das Instrument im leeren Zustande noch nicht bis an den oberen Kegel einsinkt und beim Einsinken bis an die Marke die Grenze des stabilen Gleichgewichtes beinahe erreicht wird, damit man die dem Volumen entsprechende größte Tragfähigkeit erlange; für die in der Figur angegebenen Dimensionen wird dieses erreicht, wenn das verwendete Messingblech auf den Quadratcentimeter nicht über 0,5 g wiegt (man nennt solches Sechsbug im Handel). Es wird noch etwas dünner, weil das fertige Instrument mit Bimsstein auf der Drehbank bearbeitet wird. Will man die Mittel nicht aufwenden, um ein messingenes Instrument anzuschaffen, so kann man sich, nach Tellkampf, ein solches aus einem Medizinglase machen. Man füllt hierzu den konischen Eindruck des Bodens zum Teil mit Siegellack aus und steckt in dieses den Draht mit dem Schälchen; darauf wird das Glas mit so viel Schrot gefüllt, daß es auch bei vollständigem Einsinken mittels aufgelegten Gewichtes noch aufrecht schwimmt und, wenn dieses erreicht ist, der Kork eben geschnitten und mit Siegellack überzogen. Fig. 2410 zeigt ein solches Aräometer. Beim Wägen der Körper im Wasser kommen diese in die noch übrige Vertiefung des Bodens. (W, 4 bis 7.)

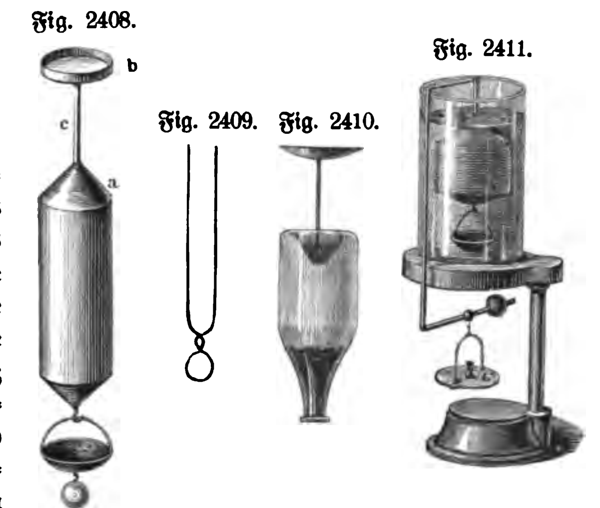


Fig. 2408. Fig. 2409. Fig. 2410. Fig. 2411.

Für jedes solche Instrument wird die Tara, d. h. das erforderliche Gewicht, um dasselbe bis zur Marke einsinken zu machen, bei einer bestimmten Temperatur genau ausgemittelt und aufgeschrieben; um das Gewicht des zu untersuchenden Körpers in der Luft und im Wasser zu finden, braucht man dann nur jene Ge-

wichte, welche noch weiter erforderlich sind, um das Instrument bis zur Marke einzusenken, von der Tara abzuziehen.

Alle diese Instrumente sind mehr oder weniger träge, d. h. sie bleiben bei einem bestimmten Gewichte bis zu verschiedenen Tiefen im Wasser. Man richtet daher das Gewicht auf dem Schälchen so, daß die Grenzen, bis zu welchen die Senkwage eingetaucht bleibt, gleich weit über und unter der Marke liegen. Man erreicht dieses durch leichtes Drücken und Heben des Instrumentes.

Eine besondere Vorsicht muß man auf Entfernung der Luftblasen verwenden, namentlich aus den Löchern des Siebes, wo sie sich besonders gern festsetzen.

Das Gewichtsaräometer von Tralles (Fig. 2411) ist etwas handlicher eingerichtet als das Nicholsonsche, welches sich bei einseitigem Auflegen der Gewichte schief stellt. Zugleich ist das Trallessche recht instruktiv, insofern es ein weiteres auffälliges Beispiel für stabiles Gleichgewicht bildet. Man kann es sich ebenso wie das vorige in verschiedener Weise selbst konstruieren, da man nur den Stiel länger zu nehmen und so, wie die Figur zeigt, umzubiegen hat. An Stelle des Tellers tritt eine frei hängende kleine Wagschale. (S. 20, K, 18.)

Buchanan (1871) empfiehlt eine nach Art eines Aräometers gestaltete Senkwage als Demonstrationswage bei Vorlesungen. Der ganze Apparat hat eine Länge von 80 cm, der Stiel ist 36 cm lang und 7 mm dick, innen mit Papierskala versehen. Die Blase ist 26 cm lang und 46 mm weit. Mithin beträgt das Volumen des Stieles etwas über 7 ccm und die Länge eines Cubikcentimeters etwa 5 cm, das Instrument ist also sehr empfindlich. Für gröbere Wägungen größerer Gewichte macht man den Stiel 10 bis 12 mm dick.

153. Das Volumeter. Benutzt man einen unten geschlossenen und durch etwas eingebrachtes Blei beschwerten Blechcylinder von 1 kg Gewicht, welcher außen etwa durch Eintauchen in ein volles Wassergefäß und Abmessen des überlaufenden Wassers in Cubikcentimeter eingeteilt ist, als Schwimmkörper, so gibt die Eintauchtiefe direkt das spezifische Volumen der Flüssigkeit (z. B. Alkohol oder Bittersalzlösung).

Fig. 2412.

Gewöhnlich nimmt man eine recht dünne, möglichst gleiche und etwa 1 cm weite Glasröhre von 3 bis 4 dm Länge, schmilzt sie unten zu, drückt den Boden eben und weitet den oberen Rand (nur unmerklich) aus, um ihm die Schärfe zu nehmen. Man setzt dieselbe in Wasser und beschwert sie mit Schrot und etwas Wachs (besser als Siegellack, da letzteres bei Temperaturveränderungen gern ein Springen der Röhre herbeiführt) so weit, bis sie senkrecht schwimmt. Das noch über das Wasser hervorstehende Stück *ab*, Fig. 2412, halbiert man in *c*, teilt nun die Länge *cd* auf einem Papierstreifen in 100 Tle. und setzt diese Teilung auch noch fort für die Entfernung *ac*. Sind die Zahlen gehörig aufgeschrieben, so schneidet man die untersten zwei oder drei Zehner weg und befestigt an den vier Ecken des Papierstreifens — der etwa halb so breit sein muß, als der Umfang der Röhre beträgt — vier Siegellacktröpfchen; außerdem richtet man ein in die Öffnung passendes dünnes Korkscheibchen, dessen Rand ebenfalls mit Siegellack überzogen ist. Das Papier wird nun über eine Thermometerröhre gekrümmt und so weit in die Röhre geschoben, daß der hundertste Strich nach *c* kommt, und an dieser

Stelle durch gelindes Erwärmen der Röhre an den Stellen, wo die vier Siegellack-knöpfchen sich befinden, befestigt. Zuletzt legt man die Korkscheibe auf und reguliert nun das unten in der Röhre befindliche Gewicht so, daß dieselbe bei der schon vorher auf die Rückseite der Skala aufgeschriebenen Temperatur genau bis 100 im Wasser einsinkt, worauf das Gewicht bei *d* durch Erwärmen der Röhre mittels des dazu gelegten Wachses eingeschmolzen und auch die Korkscheibe mittels des daran befindlichen Siegellacks auf gleiche Weise befestigt wird. Den für den Gebrauch erforderlichen Umfang wird man freilich so nie erreichen; aber wenn man zwei solche Volumeter macht, deren eines für Flüssigkeiten, die schwerer sind als Wasser, gilt, so erhält man schon einen ziemlichen Umfang. Für das Volumeter für schwerere Flüssigkeiten läßt sich die Skala direkt machen, für das andere muß man eine Flüssigkeit bereiten, deren spezifisches Gewicht, mit der Wage bestimmt, genau 0,8 ist; der Punkt, bis zu welchem das Volumeter in dieser einsinkt, ist 125, und man hat also die Skala vom Wasserpunkte an bis hierher in 25 Tle. zu teilen und diese fortan gleich aufzutragen. Selbst aber so wird man noch ziemlich weite Röhren anwenden müssen und kleine Teile erhalten. Engere Röhren aber und größere Teile erfordern eine angeblasene Kugel, zu deren Herstellung erhebliche Übung gehört.

Fig. 2413.

Fig. 2415.



154. Aräometer. Von geschichtlichem Interesse sind die Aräometer von Synesius, das Florentiner Aräometer, Leutmanns und Fahrenheits Aräometer. Auch Mostwagen, Milchwagen u. s. w. können Erwähnung finden.

Gebräuchliche Aräometerformen zeigt Figur 2413 [1]) und ein Gefäß zur Aufnahme der Flüssigkeit Fig. 2415. Bei den in der Technik angewandten Aräometern ist der Hals in Baumé-Grade geteilt. *n* solche Grade bezeichnen bei

Fig. 2414.



17,5° C das spezifische Gewicht $s = \frac{146,78}{136,78 \pm n}$, wobei das obere oder untere Vorzeichen gilt, je nachdem die Flüssigkeit leichter oder schwerer als Wasser ist.

Fr. Hugershoff in Leipzig liefert ein Aräopicnometer, bei welchem die Kugel mit einer Öffnung und eingeschliffenem Glasstöpsel versehen ist, um verschiedene Flüssigkeiten einfüllen zu können. Es sinkt natürlich in Wasser verschieden tief, je nach deren spezifischem Gewicht, kann also zur Bestimmung des letzteren dienen. (Preis 7,5 Mk.)

1) Ein Aräometerbesteck nach Fig. 2414 liefert Max Kohl, Chemnitz, zu 24 Mk.

155. **Wasserstandszeiger.** Ein Schwimmer wird häufig dazu benutzt, den Wasserstand in einem undurchsichtigen Behälter (Dampfkessel, Wasserreservoir, Brunnen u. s. w.) anzuzeigen. Ein Modell hierfür läßt sich leicht herstellen. Die Vorrichtung kann auch so eingerichtet sein, daß sie den Wasserstand selbsttätig auf einer durch Uhrwerk betriebenen Trommel aufzeichnet (Fig. 2416 K, 350 Mk.).

156. **Beseitigung des Auftriebs.** Ein recht lehrreicher Apparat zur Demonstration des Auftriebs untergetauchter Körper ist der nach Vogel (Fig. 2417) konstruierte. Setzt man den Schwimmkörper auf das Ende des durch den Boden des Glasgefäßes eindringenden Rohres, schließt den Hahn, wodurch man die Kommunikation des letzteren mit dem Gefäße unterbricht, und füllt dieses mit Wasser, so bleibt der Körper, obschon leichter als die Flüssigkeit, an seinem Orte stehen, da der Flüssigkeitsdruck nur von oben auf ihn einwirkt. Öffnet man aber nunmehr den Hahn, so daß auch von unten Flüssigkeit zutreten kann, so steigt derselbe alsbald in die Höhe. (Lb, 36.)

Fig. 2417.



Fig. 2416.



Fig. 2418.

Ähnlich wirkt der Schwimmapparat von Haedicke (1902, Fig. 2418 Lb, 15). Der Hohlraum *d* des Schwimmers steht durch die Öffnung *c* in Verbindung mit der äußeren Atmosphäre. Setzt man den Schwimmer mit dem geschliffenen Rande auf den ebenen Boden des Gefäßes auf und bläst durch *c* Luft hinein, so daß das Wasser aus *d* herausgetrieben wird, so kann der Schwimmer nicht steigen, obschon er wesentlich leichter ist als das Wasser, weil der Bodendruck fehlt.

Hartl (Z. 9, 122, 1896) demonstriert die Wirkung des Auftriebes beim Schwimmen in folgender Weise (Fig. 2419).

In einem Glascylinder *C*, dessen starker, unten ausgehöhlter Boden *n* durchbohrt ist, ist ein mit der Erweiterung *g* versehenes Glasrohr *R* fest eingekittet (bei *n*). Ein kleiner Steg *t* aus Messingblech hält das bei *o* offene Glasrohr am oberen Rande von *C* fest. Führt man, indem man *o* mit dem Daumen zuhält, diese Vorrichtung in ein mit Wasser gefülltes Gefäß *G*, so daß der eben geschliffene untere Rand von *C* auf dem Boden des Gefäßes halbdicht aufsteht, so wird der Schwimmer, nachdem man den Daumen von *o* entfernt hat, festsitzen. Allmählich bringt nun das Wasser in den Schwimmer ein und wenn dasselbe eine gewisse Höhe, z. B. *m*, erreicht hat, steigt der Schwimmer empor. Daß der Schwimmer erst dann, wenn er sich gewissermaßen mit Wasser beladen hat, zu steigen vermag, wirkt auf den ersten Anblick überraschend, umsomehr als der Schwimmer, wenn man ihn in gewöhnlicher Weise ins Wasser bringt, anfänglich höher schwimmt und allmählich, während das Wasser in *g* und *R* eindringt, tiefer sinkt, also gerade das entgegengesetzte Verhalten zeigt. (Fig. 2418 Lb, 15.)

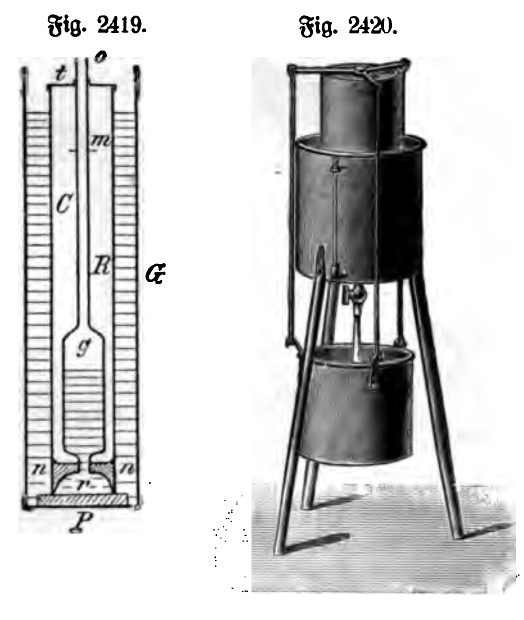


Fig. 2419. Fig. 2420.

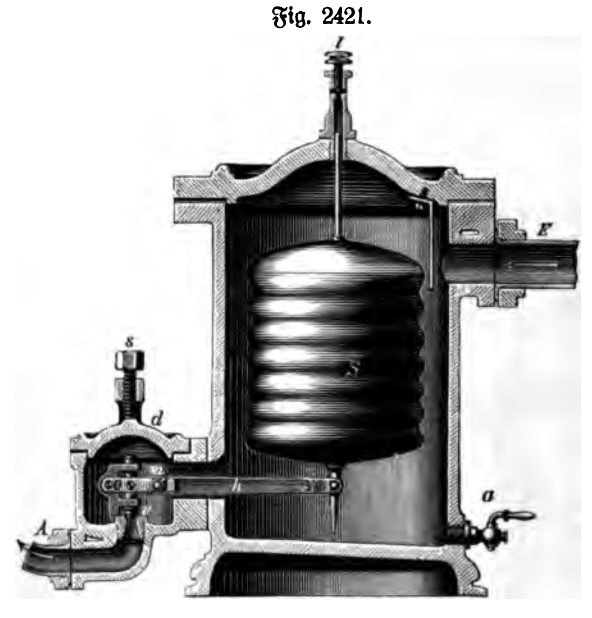
Fig. 2420 zeigt eine Vorrichtung, bei welcher das Gewicht des schwimmenden Körpers durch das aus dem Gefäß ausfließende Wasser erhöht wird. Er sinkt infolgedessen so viel tiefer ein, daß trotz des Verlustes durch das Ausfließen der an dem Wasserstandszeiger zu beobachtende Stand des Wassers in dem Gefäß unverändert erhalten bleibt. (Lb, 70.)

157. Selbsttätige Hähne und Ventile. Soll in einem Wasserbehälter konstanter Wasserstand erhalten werden, so verbindet man den Hahn der Wasserzuleitung durch ein geeignetes Hebelwerk oder einen anderen einfachen Mechanismus (über Rollen geleitete Schnüre, Zahnrad und Zahnstange u. s. w.) mit einem Schwimmer, d. h. einem nicht zu kleinen hohlen Metallkörper, der auf der Wasseroberfläche schwimmt. (Fig. 474, S. 244.) Steigt das Wasser über das gewünschte Niveau, so steigt damit auch der Schwimmer und infolgedessen wird der Hahn durch den damit verbundenen Mechanismus zugedreht, der Wasserzufluß somit unterbrochen. Sinkt der Wasserspiegel, so sinkt auch der Schwimmer und der Hahn wird wieder geöffnet.

Umgekehrt kann es auch nötig sein, den Abfluß zu regulieren, wie z. B. bei den sogenannten Kondensationstöpfen oder Kondensationswasserableitern bei Dampfleitungen. In diesen Töpfen, deren eine von vielen Formen in Fig. 2421 abgebildet ist, sammelt sich das in Dampfleitungen niedergeschlagene Kondensationswasser und fließt ab, ohne daß Dampf austreten könnte. Der Zufluß des Wassers geschieht bei dem in der Fig. 2421 dargestellten Apparate durch *E*, der Abfluß durch *A*.

Sobald das Niveau des angesammelten Kondensationswassers über die normale Höhe steigt, hebt sich der Schwimmer *S* und öffnet mittels des Hebels *h* das Ablaßventil *v*, so daß der Wasserspiegel, also auch *S*, wieder sinkt und nach Abfluß der überschüssigen Menge Kondensationswasser das Ventil *v* sich automatisch wieder schließt.

Fig. 2421.



158. Homogenität der Flüssigkeiten. Nicht homogene Flüssigkeiten sind beispielsweise Mehlbrei, Milch, Gummigutt in Wasser angerieben u. s. w.

In den meisten Fällen kann man die in der Flüssigkeit suspendierten Körperchen durch Filtrieren abscheiden, doch gibt es auch sehr feine Niederschläge, z. B. von schwefelsaurem Baryt und andere (durch Zusammengießen sehr verdünnter Lösungen der Reagentien erzeugt), welche durch jedes Filter durchlaufen und sich selbst nach langer Zeit nicht zu Boden setzen.

Gewöhnliches klares Wasser in einem mehrere Meter langen, beiderseits durch Glasplatten verschlossenen, undurchsichtigen oder mit undurchsichtiger Hülle (aus Tuch) umgebenen Rohr betrachtet, erscheint sehr trübe und mißfarbig gegen ganz reines, welches vollkommen durchsichtig und von rein blauer Farbe ist.

Das spezifische Gewicht einer solchen inhomogenen Flüssigkeit kann ebenso wie das einer reinen bestimmt werden. Schlammiges Wasser z. B. erweist sich spezifisch schwerer als reines Wasser. In kommunizierenden Röhren, in welchen auf einer Seite das Wasser durch eingebrachten Schlamm verunreinigt ist, sind die beiden Oberflächen aus diesem Grunde nicht in derselben horizontalen Ebene[1]). Der Grund der Erscheinung wird erst in dem Kapitel Hydrodynamik erörtert, da in Wirklichkeit kein Gleichgewichtszustand vorliegt.

159. Metazentrum. Zur Darlegung des Gesetzes, daß bei Körpern, welche in Wasser untergetaucht sind, der Schwerpunkt des Körpers, wenn er nicht mit jenem des verdrängten Wassers zusammenfällt, tiefer liegen müsse als dieser, kann man sich an einen Kork ein Stück Blei angießen und dieses so richten, daß das System gleiches spezifisches Gewicht hat mit dem Wasser, was ziemlich leicht zu erreichen ist, aber nur dann bleibt, wenn man einen sehr reinen Kork ausgesucht hat, der nicht so leicht durch Austreten von Luftblasen und Eindringen von Wasser schwerer werden kann.

---

[1]) Über den Einfluß suspendierter Teilchen auf den Auftrieb einer Flüssigkeit siehe Plessen, Beibl. 25, 488, 1901; über das spezifische Gewicht von Schlamm und kolloidalen Lösungen siehe Ramsay, Beibl. 26, 232, 1902.

Einen hierher gehörigen Apparat nach Haedicke zeigt Fig. 2422 (K, 60).

Die beiden gleichen Hälften des Schwimmkörpers sind durch einen Drahtrahmen verbunden, der einen mittleren verschiebbaren Steg mit Schneide besitzt. Füllt man das an drei Seiten verglaste Bassin mit Wasser und taucht mittels des Stativhalters den Schwimmkörper so ein, daß eine der Rahmenschneiden mit ihrer Mitte gegen den Halter von unten her durch den Auftrieb sich stützt, so wird sich der Schwimmkörper, je nachdem der Unterstützungspunkt über oder unter dem Angriffspunkt des Auftriebes liegt, sich in labilem oder stabilem Gleichgewicht befinden.

Um zu zeigen, daß bei auf dem Wasser schwimmenden Körpern der Schwerpunkt des Körpers nicht notwendig tiefer liegen müsse als der Schwerpunkt des verdrängten Wassers, daß aber dennoch seine Lage keine willkürliche sei, kann man sich sehr zweckmäßig zweier elliptischer Walzen bedienen, und zwar einer aus möglichst leichtem Holze und einer aus einem großen Korke von 4 bis 6 cm Durchmesser geformten. Solche Walzen haben nur stabiles Gleichgewicht, wenn die kleine Achse der Ellipse senkrecht ist. Man kann auch die Stelle des Metazentrums auf der Grundfläche bestimmen, wenn man sich beim Unterrichte so weit einläßt.

Fig. 2422.

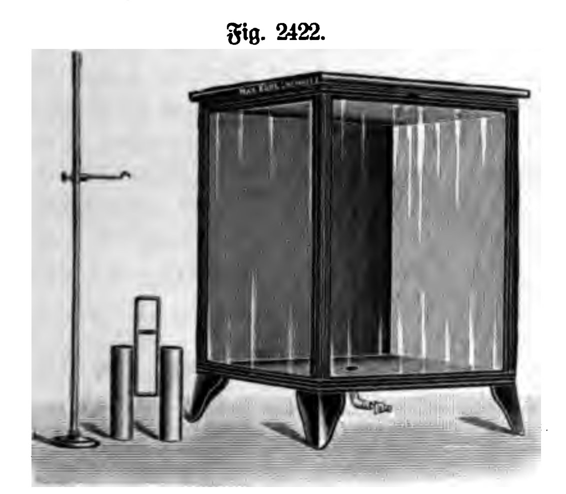


Fig. 2423.



Daß unter gewissen Umständen bei auf dem Wasser schwimmenden Körpern zwei Gleichgewichtslagen möglich sind, kann man leicht durch folgenden Versuch zeigen. Durch einen etwas großen Kork, den Fig. 2423 in halber Größe zeigt, steckt man in der Mitte zwischen Mittelpunkt und Rand einen dicken Messingdraht oder einen Bleicylinder durch, und ihm gegenüber nahe am Rande einen dünneren; wenn die Verhältnisse richtig getroffen sind, so kann der Kork stabil schwimmen, auch wenn der dicke Draht oben ist, schaukelt man ihn aber zu stark, so schlägt er um. Sollte der dicke Draht zu schwer sein, so kann man durch Abschneiden des Korkes und Befeilen des Drahtes helfen. Bei dem Korke in Fig. 2423 wiegt der dicke Draht 33 g und der dünne 10 g.

Zur Demonstration der Bedeutung des Metazentrums benutze ich ein größeres aus Blech verfertigtes Schiffsmodell, welches in einem aus Glas bestehenden Aquarium schwimmt.

Viertes Kapitel.

Flüssigkeiten.

160. Verschiebungselastizität der Flüssigkeiten. Nach Definition ist die Elastizitätsgrenze bei Flüssigkeiten gleich Null, d. h. diese besitzen keine vollkommene Verschiebungselastizität. Damit ist nicht ausgeschlossen, daß ihnen ein gewisser Grad unvollkommener Elastizität zukommt, d. h., daß sie elastische Deformationen durch vorübergehende Kräfte erleiden können, welche natürlich beim Verschwinden derselben nicht mehr vollkommen rückgängig werden. Wird eine solche elastische Deformation herbeigeführt und festgehalten, so verschwindet die Spannung allmählich (vollkommen) von selbst wieder und man nennt die Zeit, in welcher sie auf den e (= 2,71828) ten Teil ihres Wertes abgenommen hat, die Relaxationszeit. Zur Demonstration könnte man den oben erwähnten Torsionsapparat für Marineleim (S. 757) verwenden, nachdem man die Temperatur bis zum Verschwinden der Elastizitäsgrenze gesteigert hat. Zur Hervorbringung der Spannung wäre an Stelle des an der Schnur angreifenden Gewichtes ein gespanntes Federdynamometer zu verwenden. Für gewöhnliche Flüssigkeiten ist die Relaxationszeit von der Ordnung 10^{-13} Sekunden, also unmeßbar klein.

Fig. 2424.



161. Innere Reibung. In der Relaxationszeit kommt die innere Reibung oder Viskosität zum Ausdruck, zu deren Messung ebenfalls der gleiche Apparat benutzt werden kann[1]). Man kann leicht nachweisen, daß dieselbe der Deformationsgeschwindigkeit proportional ist. (Vergl. § 84.)

In der Marineleimschicht sind die Reibungskräfte (pro Quadratmeter) an Kreisen (Cylinderflächen) um die Achse um so kleiner, je größer der Radius, da mit zunehmendem Radius die Deformationsgeschwindigkeit abnimmt; die Gesamtreibung wird aber gleichzeitig größer, da die Fläche, an welcher die Reibung angreift, proportional dem Radius zunimmt[1]).

162. Kohäsion und Adhäsion der Flüssigkeiten. Die leichte Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsteilchen hat früher Anlaß zu der Meinung gegeben, die Kohäsion der Flüssigkeiten sei ebenfalls — 0.

Tatsächlich ist nur ihre Bestimmung schwierig, da sich wegen der hohen Plastizität die erforderlichen Zugspannungen nicht leicht erzielen lassen. Man muß,

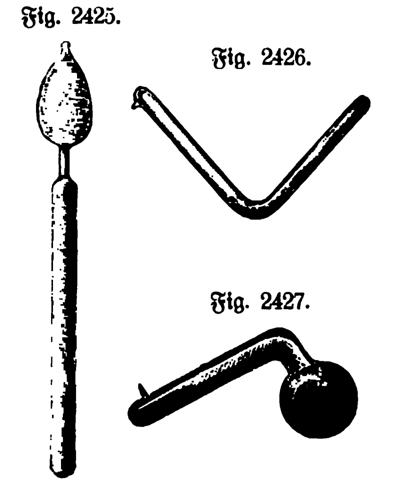
---

[1]) Einen Konsistenzmesser nach Weiß (Fig. 2424) liefert Franz Hugershoff, Leipzig, Carolinenstr. 13, zu 180 Mk.

um solche zu erhalten, die plastische Deformation verhindern, was am einfachsten durch Benutzung der Adhäsion geschehen kann [1]).

Zur Demonstration der Adhäsion dienen die früher benutzten Adhäsionsplatten, zwischen welche man etwas Wasser oder Fett gebracht hat. Man bestimmt, wie schwere Gewichte angehängt werden können, bis sofortiges Abreißen erfolgt. Bei Verwendung von Sirup, Kanadabalsam, dickem Leinölfirnis u. dergl. wird die Kraft natürlich infolge davon, daß sich wegen der großen inneren Reibung die Flüssigkeit nur schwer seitlich zusammenziehen kann, sehr groß. Bei nicht benetzenden Flüssigkeiten gelingt der Versuch nicht. (Malerei, Lithographie, Kautschukstempel, Buchdruck, Klecksographie, Buntpapierfabrikation.)

Verbindet man eine spitz ausgezogene Glasröhre durch einen starkwandigen engen, mit Band umwickelten oder umsponnenen Kautschukschlauch mit einem trichterförmigen Gefäß, füllt dieses mit Quecksilber, hebt es so, daß das Quecksilber in das Glasrohr eintritt, füllt in letzteres ausgekochtes Wasser, kocht dasselbe durch Erhitzen von außen nochmals in der Röhre aus, läßt dann das Quecksilber bis nahe zur Spitze aufsteigen und schmilzt letztere zu, so erhält man einen Apparat, in welchem man an die eingeschlossene kleine Wassersäule durch Senken des Trichters eine 1 bis 2 m lange Quecksilbersäule anhängen kann, ohne daß dasselbe durchreißt, falls wirklich die Luft völlig ausgetrieben war. Gewöhnlich mißlingt der Versuch zuerst, indem sich trotz aller Vorsicht beim Senken des Trichters eine neue Luftblase bildet, die beim Heben desselben nicht wieder verschwindet. Man öffnet dann die Spitze nochmals, entläßt die Luftblase und schmilzt von neuem zu. Derart muß man zehn und mehr mal immer wieder die ausgetriebene Luft entfernen, bis das Durchreißen nicht mehr eintritt. Ersetzt man die Spitze durch einen gut schließenden Hahn, so kann man ebenfalls einigermaßen die Erscheinung beobachten, doch bei weitem nicht in gleichem Maße. Besser vielleicht, wenn man statt Wasser eine zähere Flüssigkeit nähme, die gleichzeitig als Dichtungsmittel für den Hahn dienen könnte, da alle Spuren von Fett das Abreißen der Flüssigkeit von den Gefäßwänden außerordentlich erleichtern. Die Trennung tritt hierbei zwischen Fett und Flüssigkeit ein, während bei fettfreien Gefäßwänden Trennung nur in der Flüssigkeit möglich ist, da die Gefäßwände auch nach der Trennung noch mit einer Flüssigkeitsschicht überzogen sind. Hängt die Quecksilbersäule an der Flüssigkeit, so genügt eine mehr oder minder kräftige Erschütterung der Röhre, um das Durchreißen hervorzurufen [2]).


Fig. 2425. Fig. 2426. Fig. 2427.

Will man nur überhaupt das Vorhandensein von Kohäsion (nicht auch deren Größe) bestimmen, so kann dazu der Wasserhammer gebraucht werden, in

[1]) Bei intensiven Longitudinalschwingungen beobachtete ich (Pogg. Ann. 153, 3, 1874) milchige Trübung infolge Auftretens vieler kleiner Gasbläschen, d. h. durch Reißen der Flüssigkeit an den betreffenden Stellen. — [2]) Auf die scheinbare Kohäsion, welche bei diesem Versuche durch den Luftdruck bedingt ist, wird später bei Besprechung des letzteren zurückzukommen sein.

welchem beim Umkehren die Flüssigkeit hängen bleibt, was natürlich nur möglich ist, wenn die Teilchen der Flüssigkeit durch Kohäsionskräfte miteinander verbunden sind. Verschiedene Formen des Wasserhammers zeigen die Fig. 2425 (E, 2), 2426 (Lb, 2) und 2427 (Lb, 2).

163. Die Oberflächenspannung. Man versteht darunter den Zug (in Kilogramm, Milligramm, Dynen) pro Längeneinheit (Meter, Centimeter, Millimeter) in der Oberfläche, d. h. die Kraft, die nötig wäre, die Schnittränder zusammenzuhalten, wenn man sich die Oberfläche in zwei Teile zerschnitten denkt. Um dies zu erläutern, kann man eine gespannte Kautschukmembran zu Hilfe nehmen, muß aber darauf aufmerksam machen, daß die Oberflächenspannung bei Vergrößerung der Oberfläche konstant bleibt und nicht wie die Spannung der Membran zunimmt.

Plateau läßt einen Öltropfen in verdünntem Weingeist schwimmen. Weingeist von gleichem spezifischen Gewicht mit Olivenöl erhält man durch Vermischung von ungefähr gleichen Mengen gewöhnlichen Brennspiritus und Wasser. Ob das Ziel erreicht ist, untersucht man mit kleinen unter die Mischung gebrachten Öltröpfchen. Ist es der Fall, so bringt man mittels einer Pipette ein größeres Quantum Öl unter die Flüssigkeit, welches sich dann zur Kugel bildet. Man erhält Kugeln bis zu 2 cm Durchmesser (Fig. 2428).

Fig. 2428.

Für diesen Versuch kann man nach v. Beetz Olivenöl dadurch grün färben, daß man es einige Zeit in gelinder Wärme (etwa auf dem Ofen) über Kupferoxyd stehen läßt, öfter umschüttelt und nachher filtriert. Alkannin, welches wohl zu gleichem Zwecke gebraucht wird und dem Öl eine schöne rote Farbe mitteilt, ist aus dem Grunde nicht sehr zu empfehlen, weil es mit der Zeit auch dem Weingeist rötliche Farbe mitteilt, während eine in obiger Weise grüngefärbte Kugel monatelang in der Alkoholmischung schwebend aufbewahrt werden kann.

Um die Kugel in die Mitte der Flüssigkeit zu bekommen, sorgt man dafür, daß die obere Hälfte der letzteren etwas alkoholreicher, die untere wasserreicher ist, doch darf der Unterschied nicht zu groß sein, da sich sonst die Kugel beträchtlich abplattet.

Als Gefäß nimmt man einen kleinen viereckigen Trog aus Glasplatten durch Zusammenkitten hergestellt [1]).

Die Wirkung der Oberflächenspannung erkennt man sehr schön, wenn man die Kugel durch Zerren mittels eines steifen dünnen Drahtes deformiert und sie dann sich selbst überläßt. Sie nimmt alsbald wieder die frühere Kugelgestalt an.

Zerteilt man sie mittels eines Glasstabes in zwei oder mehrere und nähert diese einander wieder, so sieht man diese sich wieder zur früheren einzigen Kugel vereinigen.

Mittels Horizontalprojektionsapparates kann man ebenfalls sehr schön bei Benutzung eines Glastrogs wie Fig. 2429 (Lb, 2 bis 3) die Abrundung eines

[1]) Zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln, vergl. Fig. 2053, S. 659.

flachen Öltropfens nach Deformation mittels einer Nadel zeigen, ferner auch das Zusammenfließen verschieden (z. B. rot und grün) gefärbter Öltropfen, wobei ein halb rot, halb grün gefärbter, außen völlig runder, zusammengesetzter Tropfen entsteht.

Die gebrauchte Flüssigkeit filtriert man durch ein zuvor benetztes Filter, d. h. durch ein Stück Filtrierpapier, welches man passend zusammengefaltet in einen Trichter einlegt; das Öl bleibt auf dem Filter zurück und kann wieder gesammelt werden. Den Weingeist bewahrt man speziell für diesen Versuch in einer gut verschlossenen Flasche auf.

Melde (1886) empfiehlt an Stelle des Öls Petroleum zu verwenden. In diesem Falle ist nur geringer Wasserzusatz zum Alkohol nötig und die Tröpfchen vereinigen sich sehr leicht zu einem großen Tropfen, während man bei Öl etwa entstandene kleinere Kugeln nur durch zusammenführen mittels eines rauhen Eisendrahtes und Durchstechen der Oberflächenhaut wieder vereinigen kann.

Bei einem Siruptropfen in einer spezifisch gleich schweren Mischung von Öl und Schwefelkohlenstoff vermag die Oberflächenspannung die Abrundung wegen der inneren Reibung nur sehr langsam zu bewirken.

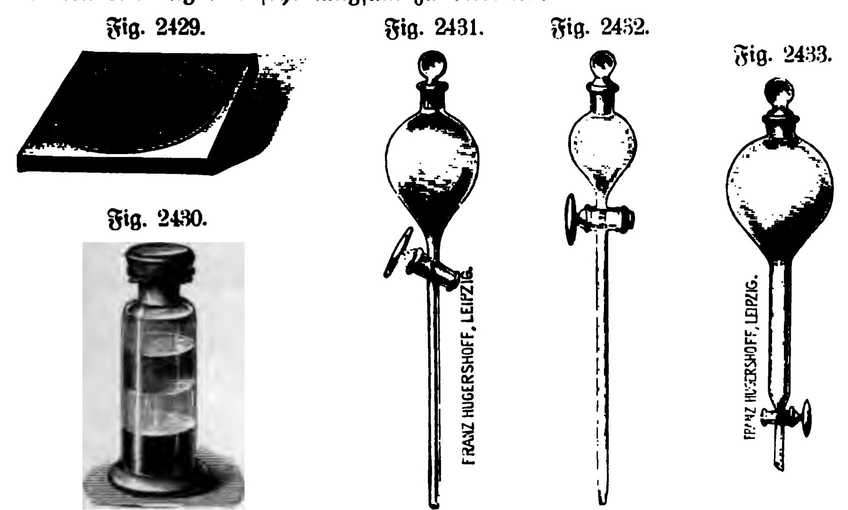


Fig. 2429. Fig. 2430. Fig. 2431. Fig. 2432. Fig. 2433.

164. Emulsionen entstehen bei tüchtigem Schütteln nicht mischbarer Flüssigkeiten, wie z. B. von Wasser und Benzol. Das Elementenglas ist eine Glasflasche, welche gewöhnlich vier verschieden gefärbte nicht mischbare Flüssigkeiten enthält, die beim Schütteln sich zu einer chaotischen Masse scheinbar vereinigen, indem die entstandenen kleinen Tröpfchen zunächst suspendiert bleiben, bei längerem Stehen aber sich wieder völlig trennen (Fig. 2430 E, 5). Die Flüssigkeiten, welche man gewöhnlich zur Demonstration der Umgestaltung dieses „urweltlichen Chaos" anwendet, sind: Quecksilber, gesättigte Kaliumkarbonatlösung, blau gefärbter Spiritus und rot gefärbtes Terpentinöl. Die blaue und rote Färbung wird durch Alkanna erzeugt. Statt des Terpentinöls kann man auch Petroleum nehmen und den Spiritus mit Alizarin färben. Statt einer Flasche benutzt man zweckmäßiger eine lange, unten geschlossene Glasröhre.

Auch der Gebrauch des Scheidetrichters (Fig. 2431 bis 2433 IIa, 1,5 bis 5) kann hier gezeigt werden, besonders zur Trennung von Quecksilber und Wasser.

165. Randwinkel. Bringt man einen Tropfen an die Grenze von zwei andern spezifisch gleich schweren Flüssigkeiten (Fig. 2434), so tritt infolge der Verschiedenheiten der Oberflächenspannungen auf den drei Grenzflächen eine Verzerrung des Tropfens ein, welche sich ergibt aus der Bedingung, daß die an der gemeinschaftlichen Grenze der drei Flüssigkeiten angreifenden Kräfte dem Gesetze vom Parallelogramm der Kräfte genügen müssen. Auch dann, wenn die spezifischen Gewichte nicht übereinstimmen, ist ähnliches der Fall, mit dem Unterschiede, daß auf die Gestalt des linsenförmig verzerrten Tropfens die Schwere von Einfluß ist, während der Randwinkel hierdurch nicht beeinflußt wird. (Fettaugen auf Suppe.) Projektion mittels des Mikroskops.

Fig. 2434.

166. Ausbreitung von Flüssigkeiten. Unter Umständen ist Gleichgewicht bei keiner Form des Tropfens möglich, derselbe breitet sich vielmehr immer weiter aus, bis zum völligen Verschwinden.

Diese Ausbreitung war bereits im Altertume bekannt und man schrieb der raschen Ausbreitung von Öl auf der Meeresoberfläche eine die Wellen beruhigende Wirkung zu. In der Tat muß die Arbeit, welche bei der fortwährend wiederholten Ausbreitung der immer wieder zerrissenen Ölschicht auf der stürmisch bewegten Meeresoberfläche geleistet wird, auf Kosten der Bewegung des Wassers geschehen. Auch heute macht man hiervon wieder Gebrauch.

Zur Demonstration eignet sich am besten Terpentinöl auf Wasser. Man füllt eine reine, möglichst große, flache, schwarze Schale, wie sie von Photographen gebraucht wird, mit reinem, insbesondere völlig fettfreiem Wasser und läßt nun mittels einer Pipette oder eines Salleronschen Tropfgläschens Terpentinöl auf die Mitte der Wasseroberfläche auftropfen. Dasselbe breitet sich rapid aus und erzeugt schöne farbige Ringe. Die geringste Dicke der Ölhäutchen beträgt weniger als 5 Milliontel Millimeter.

Für ein größeres Auditorium läßt sich die Erscheinung (nach Morton) mit Hilfe des Projektionsapparates für Horizontalprojektion leicht objektiv vorführen. Man reinigt die Schale (Fig. 2429) gut mit Ätzkalilauge und spült sie dann mit Wasser aus. Ohne sie auf der Innenseite auszutrocknen, gießt man möglichst reines Wasser hinein und setzt sie auf das Tischchen des Projektionsapparates. Läßt man nun einen einzigen Tropfen Corianderöl darauf fallen, so verteilt sich dieses sofort zu einem großen kreisförmigen Felde, welches alsbald in ein moosartiges Muster übergeht und dann in unzählige kleine Kügelchen sich trennt. Nimmt man statt des Corianderöls Zimmtöl, so entsteht auch hier anfangs ein kreisrundes Feld, aus dem aber nach und nach im Inneren kreisrunde Öffnungen aufbrechen, die sich ausdehnen und fortwährend verändern. Zweckmäßig wird das Öl mit Alkannin rot gefärbt. Sehr schön gestaltet sich auch die Ausbreitung von blau oder violett gefärbtem Alkohol auf Öl. Fig. 2435 zeigt verschiedene solche „Kohäsionsfiguren“ nach Tomlinson (Die Bedeutung der Buchstaben siehe O. Lehmann, Molekularphysik I, S. 260).

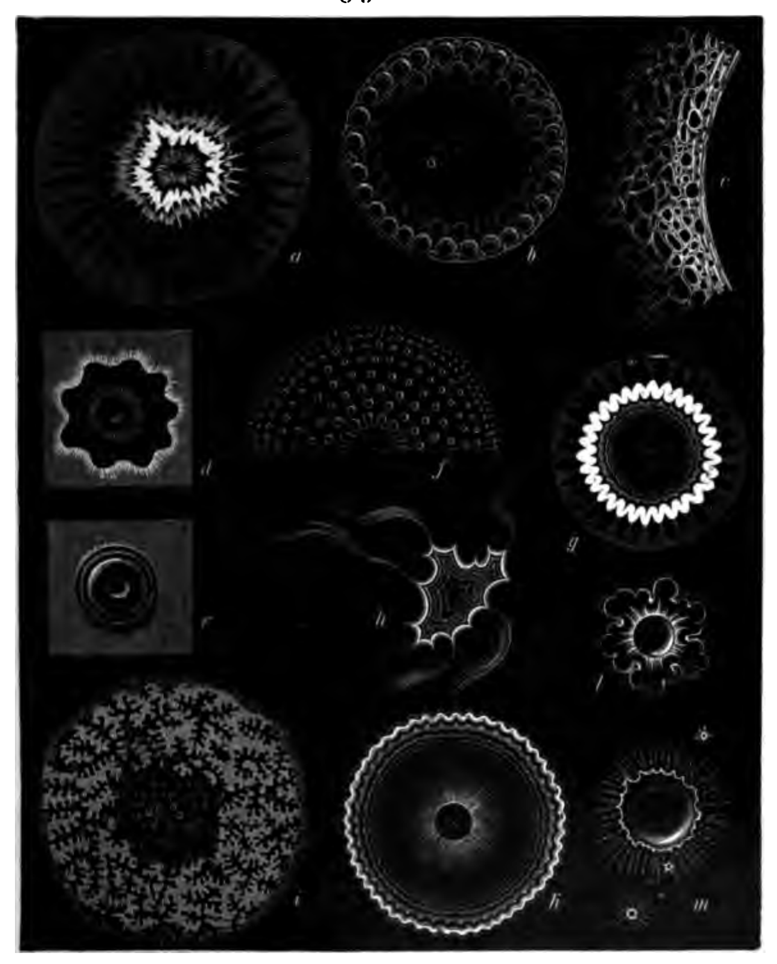
Die Wasserschicht auf einem benetzten Teller wird verdrängt, wenn man Alkohol auftropft.

Als Beispiel der technischen Verwertung der Kontaktbewegung kann man die

Herstellung von marmorierten Bücherschnitten[1]) und Buntpapier erwähnen oder demonstrieren, wobei die Figuren durch Aufspritzen von mit Ochsengalle versetzten Farbenreibungen auf Tragantschleim hervorgerufen werden. Der Buchbinder nennt die Erscheinung das „Treiben der Farben“.

Setzt man nach Richter vier Holzstäbchen von je 150 g Gewicht auf einer ruhigen Wasseroberfläche zu einem Viereck zusammen, und bringt in dessen Mitte

Fig. 2435.



einen Tropfen Ölsäure, so werden sofort alle vier Holzstücke auseinander getrieben. Sogar ein 5 Pfund schweres Brett kann noch durch einen einzigen Ölsäuretropfen fortbewegt werden.

167. Tropfenbildung[2]). Die Bestimmung der Oberflächenspannung aus dem Tropfengewicht erfordert einen Trichter mit enger Öffnung und ein kleines Becher-

[1]) Siehe Boeck, Die Marmorierkunst für Buchbindereien, Buntpapierfabriken u. s. w. Wien 1880, Hartleben; Halfer, Die Fortschritte der Marmorierkunst, Stuttgart 1891, Leo u. s. w. — [2]) Über Demonstration der Tropfenbildung durch Verlangsamung des Fallens durch Anwendung von Öl statt Luft als umgebendem Medium siehe W. König, Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unterricht 7, 83, 1893.

glas zum Auffangen der Tropfen. Die Spitze des Trichters muß starkwandig, gut eben geschliffen und vollständig benetzt sein. Man läßt etwa 100 Tropfen abfallen und dividiert dann das gefundene Gewicht durch 100. Bezeichnet r den Radius der Randkurve des Tropfens an der Trichterspitze (Fig. 2436 K, 2,50) und a die Oberflächenspannung oder Kohäsionskonstante, so ist das Tropfengewicht $g = 2\pi r . a$. Beispielsweise ergibt sich für Wasser bei gewöhnlicher Temperatur

$$\text{a) Technisch: } a = 7{,}45 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{mm}} = 7{,}45 \cdot \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \frac{\text{kg}}{\text{m}} = 0{,}00745 \frac{\text{kg}}{\text{m}},$$

$$\text{b) Absolut: } a = 0{,}00745 \cdot \frac{981000}{100} \frac{\text{Dynen}}{\text{cm}} = 73 \frac{\text{Dynen}}{\text{cm}}.$$

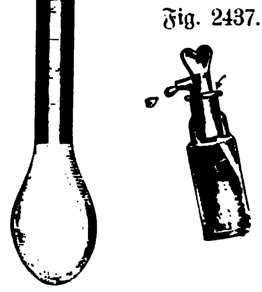
Ist einmal für eine Flüssigkeit der Wert der Oberflächenspannung bestimmt, so ergibt er sich leicht für jede andere, da sich bei gleichem r die Oberflächenspannungen verhalten wie die Tropfengewichte. So findet sich a in Milligramm pro Millimeter für Alkohol = 2,31, Benzol 2,76, Petroleum 2,44.

Aus der Oberflächenspannung ergibt sich die Oberflächenenergie, d. h. die Arbeit, welche zur Vergrößerung der Oberfläche um die Flächeneinheit erforderlich ist. Für Wasser beispielsweise findet sich, da $k = 0{,}00745 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$, für die Vergrößerung um ein Quadratmeter

$$\text{a) Technisch: } A = 0{,}00745 \frac{\text{kgm}}{\text{qm}},$$

$$\text{b) Absolut: } A = 0{,}00745 \cdot \frac{98100000}{10000} \frac{\text{Erg}}{\text{qcm}} = 73 \frac{\text{Erg}}{\text{qcm}}.$$

Diese Arbeit ist als potentielle Energie aufgespeichert, wie man deutlich daraus erkennen kann, daß ein deformierter Tropfen alsbald wieder die frühere Gestalt anzunehmen versucht und hierbei mechanische Arbeit leisten könnte. Die Spannungsenergie strebt einem Minimum zu. Bei der Ausbreitung von Öltropfen auf Wasser ist dieses Bestreben die Ursache der Ausbreitung (Strömung). Zur Zerreißung der Ölhaut, d. h. Bildung einer frischen Wasseroberfläche muß eine gleich große mechanische Arbeit geleistet werden. Wahrscheinlich beruht hierauf die Wellenberuhigung durch Öl (vergl. S. 838).


Fig. 2436. Fig. 2437.

Hier wäre auch die Verwendung der Tropfgläser zur Abmessung kleiner Flüssigkeitsmengen für medizinische Zwecke (Fig. 2437 IIu, 1,2 bis 2,3) zu erwähnen.

Aus einem fein zugespitzten Trichter tropft wegen der geringeren Oberflächenspannung Chloroform rascher aus, wenn sich die Spitze in Alkohol, als wenn sie sich in der Luft befindet.

Der Einfluß der inneren Reibung zeigt sich z. B. beim Eintropfen von Sirup in Öl.

168. **Tropfenhöhe.** Aus der Höhe flacher Tropfen auf einer nicht benetzten Platte (z. B. Quecksilber auf Glas) ergibt sich die Oberflächenspannung $a = \frac{1}{2} s . h^2$, worin s das spezifische Gewicht der Flüssigkeit und h die Höhe der Kuppe über dem größten horizontalen Durchschnitt bedeuten.

Wird die Platte vollständig benetzt, so folgt die Flüssigkeit dem Zuge der Adhäsion und breitet sich auf der Platte aus. Ist dies nicht vollständig der Fall, so erscheint der an die Platte grenzende Teil der Flüssigkeitsoberfläche gegen diese geneigt unter dem sogen. *Randwinkel*, welcher sich um so mehr dem Werte Null nähert, je besser die Benetzung ist. Ist h' die ganze Höhe der Blase oder des Tropfens, so gilt für den Randwinkel φ die Gleichung $\cos\frac{1}{2}\varphi = h'/(h\sqrt{2})$.

Aus dem Werte des Randwinkels ergibt sich der Wert der *Adhäsionskonstante* b nach der Gleichung $b = a.\cos\varphi$. Für $\varphi = 0$ wird $b = a$. Ebenso wie sich aus a die Arbeit zur Vergrößerung der Oberfläche um die Flächeneinheit berechnet, ergibt sich aus b die Arbeit zur Vergrößerung der Wandschicht um die Flächeneinheit.

Beispiele sind:

Substanz	a (Kohäsionskonstante)	φ (Randwinkel)	b (Adhäsionskonstante)	Substanz	a (Kohäsionskonstante)	φ (Randwinkel)	b (Adhäsionskonstante)
Wasser	8,253	25° 32′	+ 7,449	Chloroform	3,120	—	—
Schwefelkohlenstoff	3,274	32° 46′	+ 2,768	Steinöl	3,233	36° 20′	+ 2,604
Olivenöl	3,760	21° 50′	+ 3,490	Alkohol	2,599	25° 12′	+ 2,352
Terpentinöl . . .	3,033	27° 44′	+ 2,398	Quecksilber	55,030	150° 52′	+ 34,531

Hierher gehört auch das Aufheben von *Wasser in einem paraffinierten Drahtnetz*, von *Quecksilber in einem Florsiebe* und das *Eintauchen der Hand in Wasser*, welches mit einer Schicht Lykopodium bedeckt ist, wobei die Hand trocken bleibt. Ich verwende hierzu ein großes Becherglas. Da die Hand beim Herausziehen und Schütteln stark stäubt, ist der Versuch sehr auffallend.

Hier sind ferner zu erwähnen das *Nachziehen* der ganzen Quecksilbermasse beim Ausgießen kleiner Quecksilbermengen aus einer flachen Schale, die *Quecksilberzange*, *Quecksilberschippe* und *Quecksilberpipette* (siehe oben Quecksilberarbeiten S. 578), das Herumrollen von Quecksilber auf Tischflächen, sowie von Wassertropfen auf *staubigem Boden*.

Man kann auch darauf hinweisen, daß sich Wasser aus einer Schale leicht *ausgießen* läßt, wenn man den Rand *befettet*, oder wenn man einen *Glasstab* daran hält, an welchem der Strahl entlang gleiten kann.

Die Veränderlichkeit des Randwinkels läßt sich nach *Wilson* besonders gut bei Chloroform nachweisen. Gießt man etwas Chloroform in ein Reagenzglas, so ist die Oberfläche, wie bei anderen Flüssigkeiten, konkav, schichtet man aber reines oder säurehaltiges Wasser darüber, so wird sie stark konvex. Setzt man dem Wasser Alkalien zu, so wird sie eben. Läßt man in ein sehr reines, mit destilliertem Wasser gefülltes Glasgefäß einen Tropfen Chloroform fallen, so bildet es auf dem Boden einen kugeligen beweglichen Tropfen. Setzt man aber nun dem Wasser Alkali zu, so breitet er sich über den Boden des Gefäßes aus, neutralisiert man hierauf durch Zusatz von Säure, so zieht sich der Tropfen sofort wieder zusammen. Zweckmäßig wird das Chloroform zu diesen Versuchen mit Lackmus gefärbt. Auch Schwefelkohlenstoff mit Jod gefärbt zeigt dieselben Erscheinungen.

169. Kapillardruck. Daß die Oberflächenspannung einer nach außen gewölbten Oberfläche einen nach dem Inneren gerichteten Druck erzeugt, und umgekehrt eine konkave Oberfläche einen solchen nach außen, daß also der Druck stets nach der konkaven Seite gerichtet ist, wird gezeigt mittels eines engen, U-förmigen Glasrohres mit einem kurzen und langen Schenkel, welches sehr sorgfältig gereinigt sein muß (Fig. 2438 E, 5). Es wird vertikal aufgestellt und in den langen Schenkel Wasser eingeträufelt. Mit einiger Vorsicht gelingt es, im langen Schenkel eine höhere Flüssigkeitssäule zu erhalten, während am kurzen die Flüssigkeit mit gewölbter Oberfläche vortritt, wodurch der erwähnte kapillare Druck entsteht, der dem Überdruck das Gleichgewicht hält. Die Größe des Drucks ergibt sich im Falle kugelförmiger Wölbung durch folgende Betrachtung. Die Spannung am Umfange des vorgewölbten Tropfens ist $2r\pi . a$, der Druck im Innern sei p, somit auf die Basis des Tropfens $\pi r^2 . p$, dann muß sein, weil beide Kräfte sich das Gleichgewicht halten: $2r\pi a = \pi r^2 p$ oder $p = \frac{2a}{r}$.

Fig. 2438.

Dvořak (Phys. Zeitschr. 2, 223, 1901) empfiehlt ein weites trichterartiges Gefäß mit nur 0,5 mm Öffnung an der Spitze zu projizieren. Gießt man Wasser hinein, so bleibt eine Säule von 22 mm Höhe hängen, bei Alkohol dagegen, wegen seiner geringeren Oberflächenspannung, weit weniger.

Daß die Höhe nur von der Größe der freien Oberfläche, nicht von der Menge der Flüssigkeit abhängt, erkennt man, wenn man gleichzeitig eine Kapillare und einen in eine gleich weite feine Kapillare auslaufenden gläsernen Trichter ganz in Wasser eintaucht und dann langsam die Kapillare des Trichters nach oben gerichtet wieder herauszieht, bis die Flüssigkeit in der Kapillare zu sinken beginnt. (Projektion.)

Melde (1886) verbindet ein gleichmäßig weites Glasrohr und ein anderes mit kapillaren Verengungen (durch Ausziehen hergestellt) durch einen Kautschukschlauch und füllt das System mit gefärbtem Wasser. Wird das Rohr mit den Verengungen so weit gehoben, daß das Wasser diese nicht erreichen kann, so stehen die Wasseroberflächen in beiden Röhren gleich hoch, anderenfalls muß man die verengte Röhre um die dem betreffenden Querschnitt entsprechende Steighöhe heben.

170. Emporheben einer Flüssigkeit. Faßt man eine Plateausche Ölkugel zwischen zwei Drahtringe und zieht diese auseinander, so kann man eine cylindrische Ölmasse erhalten. Bringt man eine runde Glas- oder Metallscheibe (oder einen Ring) mit der Oberfläche einer Flüssigkeit in Berührung und zieht sie in die Höhe, so kann man bis zu gewissen Grenzen auch einen Teil der Flüssigkeit mit aufziehen. Dieser Versuch wird am einfachsten folgendermaßen vorbereitet. Auf eine runde Glas- oder Messingscheibe kittet man ein fingerlanges Stück Siegellack und an dasselbe eine dünne seidene Schnur. Man hängt sodann an die Wage einerseits statt der Wagschale diese Schnur mit der Platte und knüpft sie so, daß die Platte gerade auf eine untergesetzte Tasse mit Wasser reicht. Zweckmäßiger verwendet man die mit einem Häkchen versehene kürzere Wagschale, die man bei Bestimmung des spezifischen Gewichtes braucht. Das Siegellack wird nun durch langsames Er-

wärmen durch und durch schwach erweicht und die Platte auf das Wasser gesetzt, während in die Wagschale der anderen Seite ein kleines Gewicht kommt. Die Adhäsion hält die Platte und das Gewicht zieht das Siegellack so, daß es senkrecht zur Ebene des Wassers wird. Daß man dabei die Tasse so rücken muß, daß die Platte nirgends an dem Rande derselben anstößt, sondern frei auf dem Wasser liegt, versteht sich wohl von selbst. Da sich das Siegellack dabei etwas streckt, so macht man nachher an die Schnur einen oder mehrere Knoten, bis die Wage beim Aufliegen der Platte wieder horizontal steht.

Bei dem Versuche selbst wird die freihängende Platte zuerst mit Schrotkörnern an der Wage ins Gleichgewicht gebracht, bevor man die Tasse mit Quecksilber oder Wasser untersetzt. Durch Zugießen oder Wegnahme von Flüssigkeit mittels einer Pipette oder Heben und Senken der Wage kann man es leicht dahin bringen, daß der Wagebalken horizontal steht, wenn die Platte auf der Flüssigkeit aufsitzt. Durch allmählich aufgelegte Gewichte bringt man dann die auf die Flüssigkeit aufgesetzte Platte zum Abreißen.

Die Platte muß vor dem Versuch sorgfältig gereinigt werden, was man am besten durch Abwaschen mit Weingeist erreicht.

Sie wird mit dem Rande zuerst aufgesetzt und dann allmählich gelegt, damit alle Luftblasen entweichen können.

Fig. 2439.



Fig. 2439 (E, 85) zeigt eine zu gleichem Zwecke dienende Vorrichtung. Man kann auch eine Art Senkwage benutzen und zeigen, daß dieselbe, bis zur Wagschale eingetaucht, nicht mehr aufsteigen kann, da sie durch die Oberflächenspannung daran gehindert wird.

Auch die Wirkung der Oberflächenspannung bei Aräometern und bei der Bestimmung des spezifischen Gewichts mit der hydrostatischen Wage und mit Hilfe von Senkwagen wären hier zu erwähnen.

Einen „Kapillarschwimmer“, bestehend aus einem konischen Hohlkörper aus Blech, auf welchen 400 Glasstäbchen von 0,7 mm äußerem Durchmesser und 9 cm Länge aufgekittet sind, welcher sich beim Berühren der Wasserfläche mit einem in Seifenwasser eingetauchten Pinsel sofort um 2,5 cm hebt, beschreiben van der Mensbrugghe und Leconte (1892), siehe Prakt. Phys. 5, 108.

Den Gegensatz zum Emporheben einer Flüssigkeit bildet das Niederdrücken

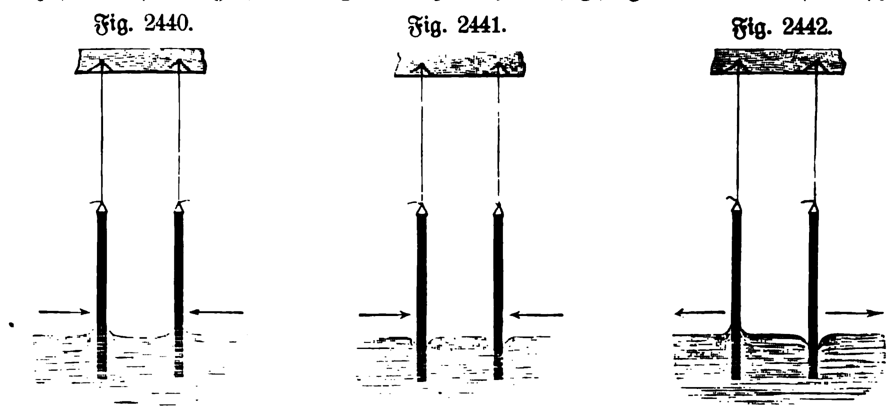
derselben, wobei sich die erforderliche Kraft ebenfalls aus Kohäsionskonstante und Adhäsionskonstante ergibt. Unter Umständen kann die Oberflächenspannung einen Körper von größerem spezifischen Gewicht als die Flüssigkeit schwimmend erhalten.

Beispielsweise kann man das Schwimmen einer befetteten Nähnadel oder eines dünnen Kupferblechs auf Wasser mittels des Projektionsapparates zeigen, wenn man als Gefäß eine flache Schale mit ebenem Boden verwendet [1]), ebenso könnte man das Laufen der Wasserspinnen und Wasserkäfer auf Wasser zeigen.

171. Kraftäußerungen halb eingetauchter Körper. Um den Versuch über Anziehung und Abstoßung schwimmender Kugeln zu machen, dienen am besten Kugeln von 1 cm Durchmesser aus Wachs (Paraffin) und Glas, oder paraffinierte und nicht paraffinierte (befettete) Glaskugeln. Eine befettete und eine nicht befettete Kugel stoßen sich ab. Es ist deshalb zweckmäßig, auch den Gefäßrand zu paraffinieren, damit sich die Kugeln nicht gegen denselben hinziehen. Mittels des Horizontalprojektionsapparates läßt sich der Versuch leicht objektiv machen.

Auf Wasser gelingt der Versuch unfehlbar; um aber auf Quecksilber denselben darzustellen, sinken gläserne Kugeln lange nicht tief genug ein. Am besten ist es,

Fig. 2440. Fig. 2441. Fig. 2442.



wenn man gläserne Kugeln beinahe zur Hälfte mit Quecksilber füllt und dann zuschmilzt. Das Quecksilber muß eine sehr reine Fläche haben.

Zu dem Versuche über die Kräfte, welche sich zwischen eingesenkten Platten zeigen, dienen dünne Platten von Glas oder Glimmer, welche man mittels Wachs an Fäden aufhängt. Sollen sie nicht naß werden, so werden sie paraffiniert. Die Figuren 2440, 2441, 2442 zeigen den Erfolg für die einzelnen Fälle durch die beigesetzten Pfeile.

Duprè macht die eine der vier vertikalen Seiten eines flachen Troges beweglich. Gießt man Wasser in denselben, so fällt die bewegliche Seite nach innen. Mensbrugghe (1884) vereinfacht diesen Versuch in der Weise, daß er einen flachen, rechteckigen Trog aus dünnem Papier herstellt; wird derselbe einige Millimeter hoch mit Flüssigkeit gefüllt, so biegen sich die Seiten, namentlich die langen, nach innen. Macht man die Breite nicht über 1,5 cm bei 17 cm Länge, so berühren sich die langen Seiten und das Gefäß scheint sich freiwillig zu schließen.

Die Kontraktion von feinem Sand beim Benetzen, die Risse in

[1]) Zu beziehen von Leybolds Nachf., Köln.

austrocknendem Lehm, die Kontraktion aufeinandergeschichteter Deckgläser beim Eindringen von Wasser[1]) sind weitere hierher gehörige Erscheinungen.

172. Fäden und Lamellen. Das Ausziehen einer Flüssigkeit zu Fäden kann man z. B. bei Sirup, geschmolzenem Schellack oder Glas zeigen[2]). Zur Bildung von Lamellen verwendet man am besten Seifenwasser.

Seifenlösung bereitet man nach Dähne (Z. 15, 264, 1902) durch Schütteln (nicht Erwärmen) von 1 Tl. sogenannter Marseillerseife in 40 Tln. destilliertem Wasser (noch besser ist reine Olivenölseife oder reines ölsaures Natron). Zu 1 Raumteil dieser Lösung setzt man 2/3 Raumteile chemisch reines Glycerin und schüttelt tüchtig durcheinander. Nach 14 tägigem Stehen im Dunkeln wird die Lösung kalt filtriert. Sie darf nicht unnötig der Luft ausgesetzt und nicht mit gebrauchter Lösung vermischt werden. Die zu einem Versuch nötige Quantität füllt man in ein besonderes Fläschchen und erwärmt leicht vor dem Gebrauch.

Eine gute Seifenlösung wird nach Antolik (1891) erhalten, indem man 5 g venetianische Seife in feine Spänchen zerschneidet, in 100 g destilliertem, warmem Wasser löst, sodann pulverisierten Zucker in einem Blechlöffel braun (nicht schwarz) brennt, damit 100 g destillierten Wassers sättigt und diese Zuckerlösung zur Seifenlösung in der Kälte zumischt. Ein anderes Rezept ist folgendes: In 250 g warmem, destilliertem Wasser werden 10 g venetianische Seife gelöst, sodann in 250 g siedendem, destilliertem Wasser 15 g weißer Zucker und die beiden Flüssigkeiten gemischt.

Nach Plateau löst man 1 Gewtl. Marseillerseife in 40 Gewtln. Wasser, setzt dann 30 Gewtle. wasserhelles Glycerin dazu und rüttelt die Mischung tüchtig um. Nach Terquem schneidet man Marseillerseife in dünne Späne, trocknet sie an der Sonne oder auf dem Ofen und löst sie bei 15° C. in Alkohol von 0,865 spezifischem Gewicht. Sodann mischt man Glycerin mit Wasser zum spezifischen Gewicht von 1,35 bei 20° C. 100 ccm der Glycerinlösung werden mit 25 ccm der Seifenlösung gemischt, die Mischung zum Sieden erhitzt, wobei sich der Alkohol verflüchtigt und die Masse durch Wasser wieder auf 100 ccm ergänzt. Man filtriert nun durch einen Wollpfropf.

Durch einen geringen Zusatz von Karbolsäure kann man nach Plateau (1885) bewirken, daß die Glycerinflüssigkeit jahrelang ihre Brauchbarkeit behält.

L. Weinhold (Z. 15, 94, 1902) gibt folgendes Rezept an: 75 g bester Leim werden gequollen, sodann geschmolzen und etwa 50 ccm Glycerin zugesetzt, sodann 10 g Seifenwurzel in 150 ccm Wasser aufgekocht, filtriert und die Lösung ebenfalls zugesetzt. Man rührt gut um, läßt langsam abkühlen und bildet Lamellen bei etwa 45°.

Sehr große Seifenlamellen lassen sich nach Melde mit folgender Vorrichtung erhalten. Zwei Handhaben A und A_1 werden durch zwei gleich lange und gleich weit abstehende Fäden miteinander verbunden und dann in Seifenwasser eingetaucht und wieder herausgezogen, so daß wenigstens in der Nähe der Handhaben Lamellen zwischen den Fäden entstehen. Auf den größten Teil während der Ausdehnung werden dabei die Fäden durch die Oberflächenspannung der Flüssigkeit zusammengehalten. Zieht man nun aber an den Handgriffen, so daß sich die Fäden strecken

[1]) Siehe Aslenasy, Naturw. Rundschau 16, 149, 1901. — [2]) Auch die Bildung dünner Schlackenwolle, Glasfäden, Glaswolle mag hier Erwähnung finden.

und parallel werden, so wird die Oberflächenspannung überwunden und die Lamellen dehnen sich über den ganzen Zwischenraum aus und bilden nun eine einzige rechteckige Lamelle. Melde konnte solche Lamellen bis zu 3 m Länge und 5 cm Breite erhalten, ohne Schwierigkeit kann man aber noch weit größere herstellen.

Bildet man ein Rechteck aus drei fest miteinander verbundenen Glasstäbchen und einem vierten lose darauf gelegten, überspannt dasselbe mit einer Seifenlamelle und gibt das bewegliche Stäbchen frei, so rollt es der gegenüberliegenden Seite zu, indem sie die Seifenlamelle zusammenzieht (Fig. 2443).

Eine Seifenlamelle, welche einen Trichter überspannt, wandert von selbst gegen die Röhre zu. Beide Versuche lassen sich objektiv darstellen.

Legt man auf eine über einen Ring (Fig. 2444 Lb, 1) ausgebreitete Seifenlamelle einen zuvor ebenfalls mit Seifenlösung befeuchteten, zu einem kleinen Ringe zusammengeknüpften Seidenfaden und sticht die Lamelle innerhalb desselben durch, so daß sie hier zerplatzt, so dehnt sich der Seidenfaden infolge der Spannung des äußeren Teils der Lamelle alsbald zu einem vollkommenen Kreise aus.

Legt man einen zu einem Ringe zusammengeknüpften Seidenfaden auf Wasser und bringt nun in

Fig. 2443.

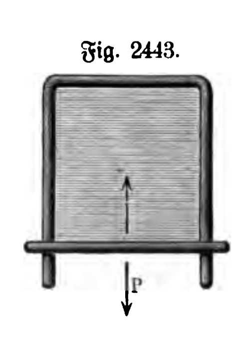


Fig. 2444.

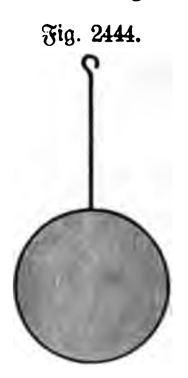
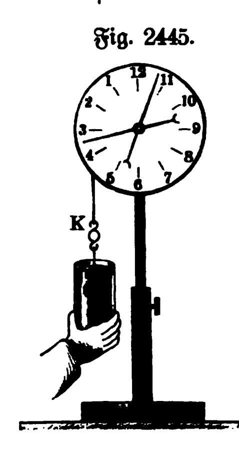


Fig. 2445.



die Mitte einen Tropfen Äther, so spannt sich der Ring sofort zu einem vollkommenen Kreise an, schrumpft aber nach dem Verdunsten des Äthers (infolge der durch Verdunstungskälte erzeugten vergrößerten Oberflächenspannung des Wassers innerhalb) wieder zusammen.

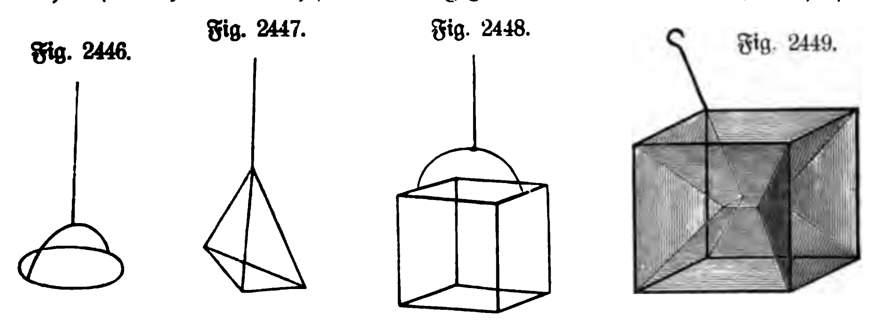
Wird eine Lamelle aus Glycerinflüssigkeit innerhalb eines Ringes erzeugt und mit Lykopodium bestreut, so wandert letzteres infolge von Ausbreitung der fettigen Schicht allmählich dem Rande zu (Plateau 1881).

Zur Messung der Oberflächenspannung hänge ich an einer Wage einen großen rechteckigen Bügel aus Messingdraht auf, welcher in eine gläserne Küvette mit Seifenlösung eintaucht. Derselbe wird zunächst tariert, sodann durch vorübergehendes Eintauchen mit einer Seifenlamelle überspannt und nun die Wage wieder ins Gleichgewicht gebracht; es erweist sich ein Zulagegewicht von 1200 mg nötig, somit beträgt, da die freie Seite des Bügels 197 mm mißt und die Oberflächenspannung auf beiden Seiten wirkt, die Spannung pro Millimeter 3,01 mg.

Schwedoff (Z. 16, 323, 1903) benutzt zur Messung der Spannung einer von einem Ring ausgezogenen cylindrischen Lamelle die bereits S. 689 erwähnte Demonstrationswage. Die Arretiergabeln werden so nahe an den Wagebalken gebracht, daß dieser nur sehr kleine Schwingungen ausführen kann. Einem tarierten,

rechts an drei Fäden hängenden Ring wird von unten eine auf einem Stativ mit Zahngetriebe stehende mit Wasser gefüllte Schale bis zum Eintauchen genähert und dann wieder zurückgezogen, bis zur Bildung einer ringförmigen Wasserlamelle von etwa 3 mm Höhe. Dabei sinkt der rechte Arm etwas, wird aber durch Heben der rechten Arretiergabel wieder in die Anfangsstellung zurückgeführt. Um nun den Zug der Lamelle zu messen, wird die linke Arretiergabel ganz herunter gelassen und der Zeiger *S* (Fig. 2128) so weit gesenkt, bis die Lamelle zerreißt, was daran zu erkennen ist, daß die Nadel plötzlich nach links ausschlägt. Dann mißt die Ablenkung des Zeigers die gesuchte Spannung. Ist die Umfangslänge des Ringes sehr groß, so ist es nötig, dem Zuge der Federn durch Zulegen von Gewichtstücken auf die linke Wagschale nachzuhelfen. Beispielsweise war bei einem Ringumfang von 146 mm die Spannung 2,5 g, woraus sich die Oberflächenspannung $= \frac{2500}{2 \times 146} = 8,5 \frac{mg}{mm}$ ergibt. Kleiber (Z. 17, 142, 1904) benutzt zum gleichen Versuch die von ihm konstruierte Federwage (Fig. 2445).

173. Minimalflächen. Man fertigt sich verschiedene Figuren aus dünnem (1 mm) Eisendraht mit Drahtstielen, wie Fig. 2446, 2447 und 2448, welche sauber


Fig. 2446. Fig. 2447. Fig. 2448. Fig. 2449.

zusammen gelötet sind. Sie werden entweder ganz oder nur mit einer oder zwei Seitenflächen in die Seifenbrühe getaucht, um die verschiedenen Figuren, welche sich bilden, zu beobachten (Fig. 2449 und 2450 Lb, 5,50).


Fig. 2450.

Permanente Plateausche Häutchen lassen sich nach S. P. Thompson (1878) erhalten aus einem Gemisch von 46 Proz. Kolophonium und 54 Proz. Kanadabalsam. Dasselbe schmilzt bei 80° und gibt bis 110° noch Häutchen. Durchaus notwendig ist indes die Vermeidung aller Unreinigkeiten. Ein solches Häutchen, gebildet auf einem 4 cm weiten Ringe aus 0,9 cm dickem Eisendraht, trug nach dem Erkalten ein cylindrisches 50 g-Gewicht von 24 mm Durchmesser, wenn es auf seinen Mittelpunkt gesetzt wurde.

Kleinere permanente Häutchen kann man auch aus zähem Tischlerleim erhalten, dem zur Verschönerung etwas Fuchsin beigemischt ist [1]).

[1]) Zahlreiche Versuche mit Seifenlamellen und Seifenblasen sind beschrieben in C. V. Boys' Seifenblasen, deutsch von Dr. G. Meyer, Leipzig 1893.

174. Haarröhrchen-Erscheinungen. Durch die Adhäsion wird eine Flüssigl an einem Körper nicht nur festgehalten, sondern auch längs der Oberfläche h gezogen. Hierdurch erklärt sich das Aufsteigen in Kapillarröhren.

Ist b die Adhäsionskonstante, so wirkt am Umfange der Oberfläche der (hobenen Flüssigkeitssäule die Kraft $2 r \pi . b$. Das Gewicht der Flüssigkeitssäule $r^2 \pi h . s$, wenn r der Radius des Querschnitts, h die Steighöhe und s das spezifi Gewicht ist. Da die Flüssigkeit durch die Adhäsion getragen wird, folgt

$$2 r \pi b = r^2 \pi h s,$$

somit
$$h = \frac{2b}{rs} = \frac{2a . \cos\varphi}{r . s}.$$

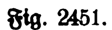
Im Falle vollständiger Benetzung wird $b = a$, somit $a = {}^1/_2 . h . r . s$, wonc man die Oberflächenspannung bestimmen kann und

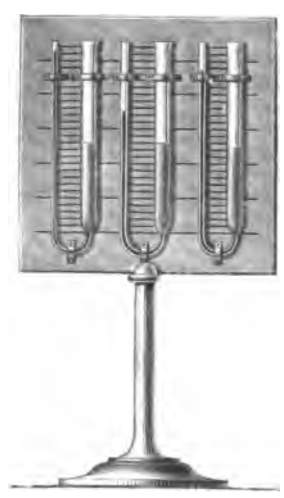
$$r = \frac{2a}{h . s},$$

woraus sich die unbekannte Weite eines Kapillarrohrs ergibt.

Wird der Randwinkel φ (vergl. S. 841) größer als 90°, so geht die Elevati in Depression über.

Am besten eignen sich zur Darstellung der Fundamentalerscheinungen kor munizierende Glasröhren, wie Fig. 2451, deren weiterer Schenkel etwa 1 bis 2 c im Lichten mißt; die daran geschmolzenen Haarröh chen haben verschiedene Weite, und zwar von 5 m bis zur Feinheit der Thermometerröhren, in etn vier Abstufungen für wässerige Flüssigkeiten und ebe soviele für Quecksilber. Die zusammengehörigen werde auf ein Brettchen befestigt, das eine Skale für je Röhre hat. Als wässerige Flüssigkeit dient am beste eine stark blaue, wie etwa Kupferoxydammoniak- od Indigolösung; welche davon aber auch genommen wir jedesmal müssen die Röhrchen nach dem Versuche m reinem Wasser gewaschen werden. Die für Quecksilbe bestimmten Röhrchen kann man ein- für allemal da mit gefüllt lassen. Bei den nässenden Flüssigkeite muß man das Brettchen zuerst auf die Seite de engeren Schenkel neigen, damit die Röhrchen imme gehörig weit hinauf naß werden, sonst erlangt ma nicht immer die größte Erhebung.


Fig. 2451.



Bindet man die Röhrchen mit Platindraht auf einer mit Teilung versehene durchsichtigen Glasscheibe fest, so wird der Apparat für Projektion verwendbar man kann die Erscheinungen einem größeren Zuhörerkreise vorführen und die an gedeuteten Messungen auf dem Projektionsschirm vornehmen.

Will man die Erscheinung nur im allgemeinen und nur an nässenden Flüssig keiten zeigen, so braucht man nur eine Anzahl Glasröhren, deren weiteste etwa 5 mm im Lichten hat, in ein mit gefärbter Flüssigkeit gefülltes Trinkglas zu stellen wie in Fig. 2452 [1]). (Vergl. auch Fig. 2455 E, 7,50.)

[1]) Fig. 2452 zeigt einen zur Projektion geeigneten Apparat, zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln, zu 27 Mk.

Die Befestigung der Röhrchen geschieht in einfachster Weise in der Art, daß man dieselben an eine Siegellackstange anschmilzt, oder wie bei Fig. 2453 Lb, 12.

Zu den Versuchen mit Glasplatten läßt man sich zwei Paare aus Stücken von Spiegelglas zuschneiden von etwa 10 bis 12 cm Länge auf 6 bis 8 cm Breite und schleift deren Kanten ab. Man richtet sodann vier gleich dicke kleine Stückchen Messingblech, die man an die vier Ecken zwischen das eine Paar legt, um parallele Platten zu erhalten.

Vier andere Stückchen Messingblech, wovon zwei aus dem allerdünnsten genommen werden, zwei aber bis 3 mm dick sind, dienen dazu, um dem anderen

Fig. 2452.

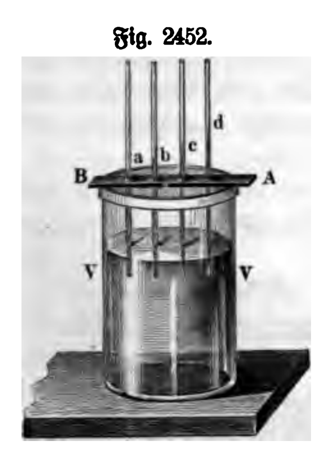


Fig. 2454.



Fig. 2453.

Fig. 2455 a.

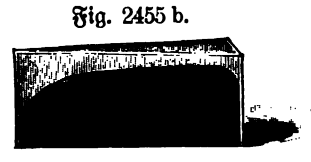


Fig. 2455 b.

Plattenpaare eine geneigte Lage zu geben. Beide Paare werden dann mit gewichstem Bindfaden ein paarmal in der Mitte umschlungen. Als Flüssigkeit benutzt man dieselbe, welche für die Röhrchen zugerichtet wurde. Auch diese Platten nimmt man nach dem Gebrauche auseinander, reinigt sie und richtet sie gleich wieder für den nächsten Versuch zu. Man muß besondere Sorgfalt auf die Reinigung der Platten verwenden, denn wenn dieselben auch nur etwas schmutzig sind, so bildet die Flüssigkeit bei den parallelen Platten keine gerade Linie und bei den geneigten keine reine Hyperbel mehr; am besten legt man die Platten einmal ganz in die Flüssigkeit, damit dieselben innen naß werden.

Man hat zweckmäßig den Apparat so eingerichtet, daß sich die Platten auf einer Seite durch eine Schraube beliebig nähern oder voneinander entfernen lassen, während sie auf der anderen Seite durch Federn beständig in Kontakt gehalten werden (Fig. 2454 K, 17).

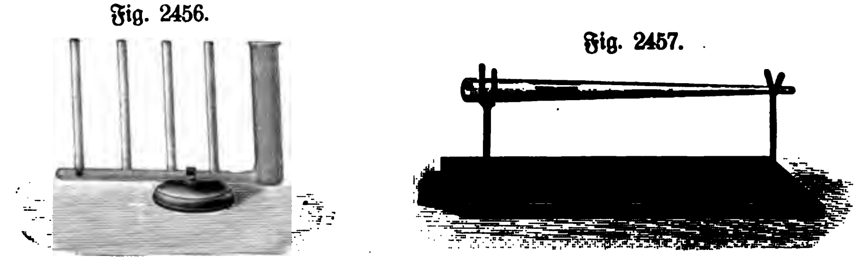
Die Depression des Quecksilbers zeigt man in der Art, daß man an die eine ebene Wand eines mit Quecksilber gefüllten Glasgefäßes eine Glasplatte andrückt. Das Quecksilber steht dann in dem kapillaren Raume tiefer als außen. Leybolds Nachf. liefern zu gleichem Zwecke keilförmige Glasgefäße wie Fig. 2455a und b (Preis 5 Mk. pro Stück).

Stöhrer konstruiert, um die Depression des Quecksilbers zu zeigen, ein ganzes System kommunizierender Röhren von verschiedener Weite, die auf eine und dieselbe Horizontalröhre aufgesetzt sind. Der Apparat kann übrigens auch für Kapillarattraktion dienen, wenn er mit gut gefärbtem Wasser gefüllt wird (Fig. 2456 S, 4).

Wird ein Quecksilbertropfen in ein konisches Kapillarrohr vom engeren Ende her eingebracht, so bewegt er sich von selbst gegen das weitere (Fig. 2457).

Werden die beiden Schenkel eines U-förmigen Kapillarrohres mit verschiedenen Flüssigkeiten gefüllt, z. B. Wasser und Öl, oder Wasser und Alkohol, so verhalten sich die Höhen nicht einfach umgekehrt wie die spezifischen Gewichte, da noch die Kapillarwirkung hinzukommt.

Das Aufsteigen von Wasser in Erde zeigt man in der Art, daß man ein weites Glasrohr durch Gaze verschließt, mit Sand, trockenem Lehm u. dergl.


Fig. 2456. Fig. 2457.

Pulvern füllt und in ein flaches Gefäß mit Wasser stellt. Im Sande ist natürlich die Steighöhe am geringsten.

Das Aufsaugen von Wasser durch poröse feste Körper zeigt man an einer unglasierten Ton- oder Gipsplatte, welche durch Ausbreiten von Gipsbrei auf einer Glasplatte erhalten wurde. Die Fläche einer solchen Gipsplatte, welche dem Glase anlag, ist sehr glatt, saugt aber dennoch einen aufgebrachten Wassertropfen begierig ein, vorausgesetzt, daß der Gips gut ausgetrocknet war. Platten von gebranntem Ton werden in chemischen Laboratorien gebraucht, um z. B. einen kristallinischen Brei von der darin haftenden unreinen Mutterlauge zu befreien.

Man erzeuge einen Ölfleck auf Papier oder Holz, bestreiche die Stelle mit Tonbrei und lasse trocknen. Der trockene Ton saugt das Öl in sich auf und der Fleck ist bald nahezu verschwunden.

175. **Mischung von Flüssigkeiten.** Faßt man eine Flüssigkeit als Molekularaggregat auf, so entsteht die Frage, ob eine andere Flüssigkeit durch Kapillarwirkung in die Poren dieses Aggregates hineingezogen werden kann. Tatsächlich findet ein solches Eindringen statt, dasselbe ist indes der neueren Lösungstheorie gemäß nicht als Wirkung der Adhäsion, sondern lediglich als Folge des Bewegungszustandes der Moleküle aufzufassen.

Ebenso wie an der Oberfläche einer im leeren Raume gedachten Flüssigkeitsmasse ein Binnendruck herrscht, welcher die Masse trotz der lebhaften Bewegung

der Moleküle zusammenhält, besteht auch an der Grenze zweier verschiedener Flüssigkeiten ein Binnendruck, falls nicht etwa zufällig die Molekularkräfte beider Molekülarten gleich sind, so daß sich die Kräfte, wie bei den Molekülen im Inneren einer einheitlichen Flüssigkeit, gegenseitig aufheben.

In diesem letzteren Fall wird die Oberflächenspannung = 0, es tritt vollkommene Mischung oder physikalische Lösung ein.

Ein Wassertropfen in einem spezifisch gleich schweren Gemisch von Schwefelkohlenstoff und Petroleum hat noch große Tendenz, sich kugelförmig abzurunden. Bei einem Tropfen Sirup statt des Wassers erfolgt die Abrundung wegen der beträchtlichen inneren Reibung (Zähigkeit, Viskosität) nur langsam; ein Siruptropfen in Wasser gebracht nimmt dagegen jede beliebige Form an, die man ihm gibt, und verliert bald seine scharfe Oberfläche, da seine Moleküle sich zwischen denjenigen des Wassers ausbreiten, in das Wasser diffundieren.

Das Auswandern der Moleküle im Falle der beschränkten Mischbarkeit trotz des hemmenden Einflusses der Oberflächenspannung deutet man sich derart, daß die Geschwindigkeiten der Moleküle sehr verschieden sind, so daß einzelne wohl im stande sind, die Schranke zu durchbrechen, während die übrigen zurückgehalten werden.

Flüssigkeiten, welche sich vollkommen miteinander mischen lassen, sind Alkohol und Wasser. Man kann die Erscheinung leicht objektiv machen, wenn man das mit etwas Fuchsin oder Chrysoidin gefärbte Wasser in den in einem Glastrog mit parallelen Wänden befindlichen Alkohol eintropfen läßt.

Flüssigkeiten, die nur teilweise mischbar sind, sind Wasser und Äther. Letzterem erteilt man durch Schütteln mit zerrissenen grünen Blättern, Gras u. dergl. grüne Farbe. Zweckmäßig setzt man ihm auch etwas Alkohol zu. Die ersten Tropfen Wasser, welche man einfallen läßt, werden noch, namentlich nach dem Schütteln, absorbiert, bald aber ist die Lösung gesättigt und der Überschuß bleibt auch nach dem Schütteln als klare Schicht am Boden. Ebenso vermag das Wasser, wenn man Äther eintropfen läßt, einige Tropfen desselben noch aufzunehmen, die späteren nicht mehr. (Konzentration, Sättigungskonzentration.)

Zwei Flüssigkeiten, welche nahezu gar nicht zu mischen sind, sind Wasser und Benzol. Daß aber ersteres noch etwas Benzol aufnehmen kann, ist leicht durch Geschmack und Geruch zu erkennen und anderenfalls ist ein Wassergehalt im Benzol durch Natrium nachzuweisen, ja man muß, um überhaupt zu dem Versuche brauchbares Benzol zu erhalten, dasselbe erst über Natrium destillieren. Leichter ist der Nachweis bei Petroleum und Wasser.

Daß an der gemeinschaftlichen Grenze vollkommen mischbarer Flüssigkeiten keine Oberflächenspannung vorhanden ist, kann man an gefärbten Siruptropfen in Wasser zeigen.

176. Diffusion. Zur Demonstration der Diffusion benutze ich eine unten geschlossene, an einer weißen Latte befestigte lange Glasröhre, welche zur Hälfte mit Wasser und darüber mit rotgefärbtem Alkohol gefüllt wird. Bei tagelangem Zuwarten kann man die Langsamkeit der Diffusion erkennen. Die Intensität des Diffusionsstromes, d. h. die Masse der pro Sekunde durch den Querschnitt q diffundierenden Substanz i ergibt sich aus der Gleichung $i = \delta \cdot \frac{c_1 - c_2}{l \cdot q}$, worin c_1 und

c_2 die Konzentrationen an zwei um die Strecke l cm voneinander abstehenden Q[illegible] schnitten bedeuten. Unter Konzentration ist dabei zu verstehen die in 1 ccm [illegible] haltene Substanzmenge in g. Die Diffusionskonstante δ beträgt bei Diffusion [illegible] Wasser beispielsweise für Essigsäure $9{,}28 . 10^{-6}$, für Salzsäure $20{,}9 . 10^{-6}$, Traubensäure $4{,}62 . 10^{-6}$ u. s. w. im absoluten System.

Im technischen System wären natürlich die technische Masseneinheit ([illegible] Hyl) und das Meter zu benutzen.

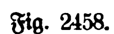
Bezeichnet man mit v die Geschwindigkeit der diffundierenden Substanz [illegible] mit d die Dichte, so ist

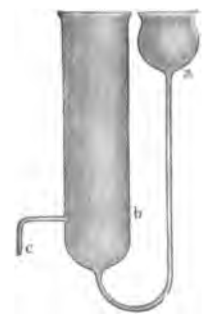
$$i = q . v . d, \text{ somit } v = \frac{i}{q . d} = \frac{\text{Strombichte}}{\text{Massendichte}}.$$

Bei Benutzung der absoluten Einheiten wird dieselbe in cm/sec, bei [illegible] wendung der technischen in m/sec gefunden [1]).

Die Diffusionsgeschwindigkeit ist außerordentlich klein, trotz der Größe [illegible] Binnendrucks, welcher auf entsprechend energische Bewegung der Moleküle schließ[en] läßt, da er dieser, d. h. den dadurch bedingten Stoßkräften der Moleküle das Glei[ch]gewicht hält. Ursache ist die außerordentliche Kleinheit der Moleküle und de[r] Zahl, wodurch zahlreiche Zusammenstöße, also bedeutende Reibung bedingt wi[rd]. Nernst [2]) berechnet die Kraft, welche nötig ist, 1 Grammmolekül Rohrzucker (= 34[2]) mit der Geschwindigkeit von 1 cm/sec in Wasser zu verschieben, da die Diffusion[s]konstante = 0,312, zu 6,7 Milliarden Kilogramm. Ähnliche Werte würden [sich] für eine diffundierende Flüssigkeit ergeben.

Um bei weiteren Gefäßen die allmähliche Diffussion mischbarer Flüssigkei[ten] zu zeigen, ist es nötig, dieselben zunächst sehr sorgfältig übereinander zu schicht[en]. Handl (1884) benutzt dazu einen Winkelheber, mittels dessen er die schwer[ere] unter die leichtere einbringt. Man könnte auch einfach, nachdem das Gefäß mit [der] leichteren Flüssigkeit gefüllt ist, ein enges Glasrohr einstellen, welches durch ein[en] Kautschukschlauch mit einem tiefer stehenden Trichter in Verbindung steht. N[ach] Eingießen der schwereren Flüssigkeit in diesen würde man durch vorsichtiges Heb[en] des Trichters den Übertritt der Flüssigkeit bewirken. Allerdings müßte vor d[em] Einstellen des Glasrohres aus diesem und dem Schlauch [die] Luft entfernt und durch die schwerere Flüssigkeit ersetzt sei[n]. Poske empfiehlt, erst die schwerere Flüssigkeit einzufüll[en], darauf eine Holzscheibe mit zentrisch aufgesetztem vertikale[m] Stab schwimmen zu lassen und nun die leichtere Flüssigk[eit] langsam an dem Stabe hinunter fließen zu lassen, bis d[as] Gefäß gefüllt ist. Die dann obenauf schwimmende Schei[be] kann nun ohne Störung der Grenzschicht entfernt werden.


Fig. 2458.



Weinhold bringt, ebenso wie Uppenborn (188[illegible]) etwas unterhalb der Stelle des Gefäßes, wo sich die Kontak[t]zone befindet, einen Hahn an und läßt durch diesen die g[e]mischte Flüssigkeit ausfließen, bis sich die reine spezifisch leichtere direkt über d[er] schwerere gelagert hat (Fig. 2458 K, 1,50).

[1]) In Lehrbüchern der physikalischen Chemie wird die Konzentration = 1 genann[t], wenn 1 Liter 1 Grammmolekül der Substanz enthält, d. h. soviel Gramm als da[s] Molekulargewicht beträgt. — [2]) Nernst, Theoretische Chemie, 4. Aufl., Stuttgart 19[illegible] S. 161.

Bosse (Z. 10, 248, 1897) empfiehlt konzentrierte Kupfervitriollösung über Glycerin zu schichten. Anfänglich ist die Grenze sehr scharf, schon nach Verlauf einer Stunde aber zeigt das Glycerin eine bläuliche Färbung, und am nächsten Tage sehen beide Flüssigkeiten ganz gleich aus. Gießt man Wasser auf Kupfervitriollösung, so diffundiert die Lösung so langsam, daß der Versuch Wochen dauert.

Läßt man Amylalkohol in Alkohol fließen, welcher über Wasser geschichtet ist, so erscheint der Strahl im Alkohol als Schliere, zieht sich aber beim Eintritt in das Wasser wieder in Tropfen zusammen.

177. **Kontaktbewegung.** Die stationäre Strömung bei Ausbreitung einer Flüssigkeit auf einer anderen, mit welcher sie sich unbeschränkt mischt, kann man leicht mittels des Horizontalprojektionsapparates zeigen, auf welchen eine mit Wasser gefüllte Glasschale gesetzt wird, in welche man zweckmäßig von unten durch eine feine

Fig. 2459.



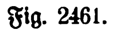


Fig. 2461.



Fig. 2462.

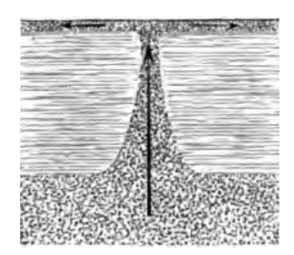


Fig. 2460.



Kapillarröhre blau oder rot gefärbten Alkohol eintreten läßt. Das andere Ende der Kapillare steht mit einem Trichter in Verbindung, aus welchem Alkohol nachfließt. Einfacher läßt man den Alkohol aus möglichst geringer Höhe auftropfen.

Interessant sind die von E. H. Weber zuerst beschriebenen Strömungen, welche auftreten, wenn eine Luftblase an die Grenzschicht zwischen Alkohol und Wasser gebracht wird. Um die Strömungen besser wahrnehmen zu können, nimmt man mit Fuchsin gefärbte Harzlösung, welche beim Mischen mit Wasser einen feinen Harzniederschlag erzeugt, der die Bewegungen bequem zu verfolgen gestattet, oder Alkohol, welcher durch in Wasser unlösliches Anilinblau gefärbt ist. Man bringt ein kleines Töpfchen davon auf den Objektträger eines Mikroskopes, bedeckt es mit einem flachen Uhrglas, die konkave Seite nach oben und läßt nun um den Rand luft- und kohlensäurehaltiges Wasser herumfließen. Die Luftblasen an der Grenze finden sich dann von selbst ein. Ist das Uhrglas nicht hinreichend eben, so zeigt der Alkohol infolge seiner Leichtigkeit ein Bestreben, nach dem Rande zu entweichen. Man bringt dann umgekehrt das Wasser in die Mitte und läßt es von Alkohol umfließen. Die Fig. 2459 bis 2462 deuten den Verlauf der Strömungen an. (Siehe O. Lehmann, Molekularphysik I, S. 271.)

Zuweilen tritt ein regelmäßiges Pulsieren in der Strömung ein, indem (infolge der Trägheit) der Alkohol über sein Ziel hinausschießt, die Luftblase momentan

ganz umhüllt, so daß also die Bedingung für die Bewegung fortfällt, dann in Wasser diffundiert, so daß schließlich doch wieder Wasser die eine Hälfte der Luftblase begrenzt, worauf dann die Strömung von neuem beginnt u. s. w. Weit langsamer und bequemer zu verfolgen sind diese Strömungen unter gleichen Umständen bei einer ziemlich zähen Lösung von Kautschuk in Benzol, welche mit stark wasserhaltigem Alkohol in Berührung gebracht wird. Es bildet sich in der Kautschuklösung ein feinkörniger Niederschlag, der die Strömung genau zu verfolgen gestattet. Auch nach dem Aufhören der Strömung zeigen die durch das Zusammendrängen der Körnchen nach den Orten intensivster Strömung entstandenen Figuren die Richtung der Strömungslinien deutlich an.

Bewegung infolge von Oberflächenspannungsdifferenzen würde auch eine Flüssigkeitssäule in horizontaler Glasröhre zeigen müssen, wenn sie zur Hälfte aus Wasser, zur anderen Hälfte aus Alkohol oder Seifenwasser besteht, da die Zugkräfte der Adhäsion an beiden Enden verschieden sind, an der gemeinsamen Grenze aber keine Kraft wirken kann.

Ähnliches gilt, wenn Öl und Benzin in den Poren von Tuch zusammentreffen. Wenn man daher Benzin auf einen Ölfleck auftropft, so wird derselbe dadurch nicht beseitigt, sondern im Gegenteil weiter ausgedehnt. Will man ihn beseitigen, so muß das Benzin ringsum aufgetragen werden und durch Andrücken eines Fließpapiers auf die Mitte des Flecks der ölreichen Lösung Gelegenheit gegeben werden, dort zu entweichen.

Fig. 2463.

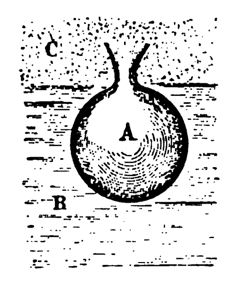


Fig. 2464.

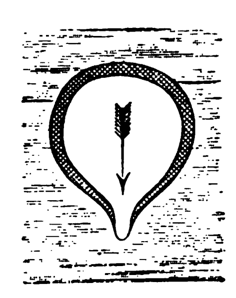
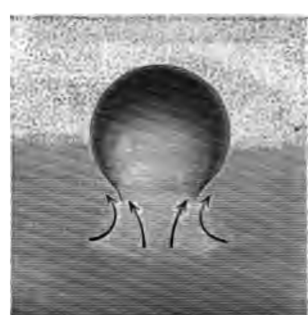


Fig. 2465.



178. **Halbbegrenzte Tropfen.** Zur Herstellung halbbegrenzter Tropfen kann man einen Tropfen aus mit Alkohol verdünntem Chloroform an die Grenze von Amylalkohol und von mit Petroleum verdünntem Maschinenöl bringen[1]).

Sobald er die Grenze erreicht, scheint er (infolge des Kapillardrucks) gewissermaßen zu explodieren, da an der Berührungsstelle die Oberflächenspannung und damit der Kapillardruck verschwindet, während er im übrigen bestehen bleibt (Fig. 2465).

179. **Physikalische Lösung fester Körper.** Bringt man Zucker mit Wasser in Berührung, so wandern Zuckermoleküle infolge der sogenannten Lösungstension in das Wasser. Der Versuch läßt sich leicht und schön mittels des Schlierenapparates darstellen. Man benutzt einen Trog mit parallelen Glaswänden, füllt ihn mit Wasser und taucht einen Glasstab ein, an welchem man mit etwas Wachs

[1]) Weitere Versuche über die Bildung halbbegrenzter Tropfen, speziell die Bedeutung der Fig. 2463 und 2464, siehe O. Lehmann, Wied. Ann. 43, 516, 1891.

einen Zucker- oder Salzkristall befestigt hat. Man sieht ringsum die schönsten Schlieren entstehen und rasch streifenartig durch die Flüssigkeit herabsinken.

Im kleinen kann man die Erscheinung mit dem von Heumann angegebenen Apparat sehr hübsch zeigen. Ein 5 bis 6 cm weiter Glascylinder wird mit weißem Flor (Tüll) unten überbunden, auf den so hergestellten Siebboden einige Kristalle von übermangansaurem Kalium aufgelegt und die Vorrichtung in ein größeres Glas mit Wasser eingetaucht. Man sieht alsbald von den Kristallen aus intensiv rot gefärbte, weithin sichtbare Bänder der entstandenen Salzlösung durch das Wasser herabsinken, bis die Kristalle verschwunden sind (Fig. 2466 Lb, 2,50). Sehr hübsch gestaltet sich der Versuch mit Hilfe des Projektionsapparates. Man leimt zwischen zwei Spiegelglasplatten einen allseitig gut mit dickem Leim überstrichenen U-förmigen Pappdeckelstreifen (eventuell mehrere aufeinander gelegt) und stellt sich so einen sehr flachen Trog her, den man mit Alkohol füllt. Bringt man nun an einen Glasstab angeleimte Körnchen von in Alkohol löslichen Anilinfarbstoffen hinein und projiziert das Gefäß auf einen Schirm, so kann man die prachtvollsten Farbenerscheinungen erzeugen.

Fig. 2466.



Farbstofflösungen lassen sich außerordentlich stark verdünnen und da die kleinste Menge verdünntester Lösung, welche eben noch eine Färbung erkennen läßt, mindestens einige Moleküle des Farbstoffs enthalten muß, so kann man eine obere Grenze für deren Gewicht und Volumen ermitteln (der Durchmesser $d = 10^{-7}$ mm).

Ebenso wie bei der Mischung von Flüssigkeiten wird schließlich ein Sättigungspunkt erreicht, die Konzentration steigt nicht mehr höher. Diese äußerste Konzentration (technisch: Hyl pro cbm oder Hyl pro Hyl) bestimmt die Löslichkeit der Substanz.

Als Einheit der Löslichkeit kann im absoluten System die Löslichkeit von 1 g in 1 ccm oder in 1 g oder von 1 Grammmolekül (Mol.) im Liter u. s. w. benutzt werden. Gewöhnlich gibt man den Prozentgehalt der Lösung an, d. h. wieviel Gramm der gelösten Substanz auf 100 g des Lösungsmittels entfallen.

Bezüglich der Diffusion gelöster fester Stoffe gilt dasselbe wie für Flüssigkeiten. Sie erfolgt äußerst langsam. Beispielsweise wandern bei Rohrzucker 0,5 g pro qcm im Tag.

Beispiele von relativen Diffusionskonstanten sind:

Chlorkalium	1	Kohlensaures Natron	0,5436
Chlornatrium	1,8337	Schwefelsaures Kupferoxyd	0,3440.

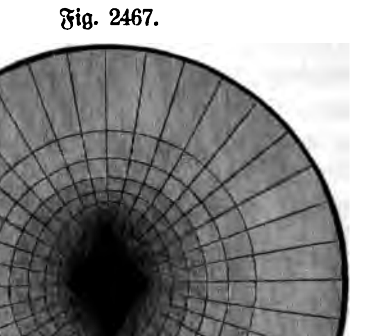
Die absolute Diffusionskonstante von Chlornatrium ist je nach der Temperatur und Konzentration der Lösung = 80 bis 100 × 10^{-7}. Es ist dies diejenige Menge Chlornatrium, welche in 1 Sekunde durch 1 qcm geht, wenn die Konzentrationszunahme pro 1 cm = 1 g pro ccm ist.

180. Niveauflächen und Stromlinien. Bringt man auf den Objektträger des Mikroskops oder, falls die Erscheinung für ein größeres Auditorium objektiv gemacht werden soll, des Projektionsmikroskops, einige Stäubchen von Fuchsin, bedeckt sie mit einem flachen Uhrglas, die konkave Seite nach oben, stellt das Mikro-

skop ein und läßt nun einen Tropfen Alkohol zufließen, so sieht man alsbald um die Körnchen sich rote Höfe bilden, die sich deutlich wahrnehmbar immer mehr und mehr ausbreiten, wenn es auch lange dauert, bis die Färbung der ganzen Flüssigkeit gleichmäßig geworden ist.

Aus dem Diffusionsgesetz ergibt sich der Verlauf dieser Flächen und Linien und der Satz, daß sich dieselben an den Ecken und Kanten des sich auflösenden Körpers am stärksten zusammendrängen, daß sich also der Körper dort am schnellsten auflöst und somit gerundete Gestalt anzunehmen sucht (Fig. 2467). Dieselben Tafeln, welche zur Demonstration der Niveauflächen und Kraftlinien für die Gravitation benutzt wurden und später auch zur Erläuterung der Wasserströmung in poröser Erde der Wärmeleitung, der Beschaffenheit elektrischer und magnetischer Felder dienen, können auch hier verwertet werden. Sie beziehen sich allerdings auf den Fall stationärer Strömung, welche hier, da sich die Form des Körpers während der Auflösung ändert, nur für kurze Zeit bestehend angenommen werden kan.

Fig. 2467.



181. Campherbewegung. Man versteht darunter die lebhafte Bewegung, welche kleine Campherstücke oder mit ätherischen Ölen getränkte Papierschnitzel zeigen, wenn sie auf Wasser geworfen werden. Die Wasseroberfläche muß natürlich rein sein und entsprechend der allmählich eintretenden Verunreinigung der Wasseroberfläche durch Campher oder die ätherischen Öle wird auch von selbst die Bewegung allmählich immer schwächer. Sie läßt sich leicht mittels des Horizontalprojektionsapparats objektiv darstellen.

Läßt man nach Tromelin (1882) von einer angezündeten Kerze mehrere Tropfen aus einer Entfernung von 15 bis 20 cm in ein Gefäß mit Wasser fallen und bringt dann in die Mitte der halbkugelförmig erstarrten Tropfen kleine Stückchen Seife, so werden diese wie durch einen unsichtbaren Wind abgestoßen bis an die Wände des Gefäßes. Das Experiment kann man zwei- bis dreimal mit demselben Wasser wiederholen, dann aber gelingt es wegen der gelösten Seifenmenge nicht mehr.

182. Lösungsfiguren. [Hierher gehört auch die Besprechung der eigentümlichen Formen, welche kugelförmig geschliffene Kristalle bei lange fortgesetzter Ätzung annehmen, sowie der Lösungsfiguren, welche F. Exner beim Auftreffen eines dünnen Strahles des Lösungsmittels auf Kristallplatten erhielt. Zur Demonstration dürften indes diese Versuche nicht geeignet sein.

Ätzfiguren. Taucht man einen Alaunkristall momentan in Wasser, zieht ihn sofort wieder heraus und trocknet ihn, so zeigt er sich unter dem Mikroskop be-

deckt mit regelmäßig dreiseitigen Vertiefungen, den Ätzfiguren. War der Kristall plattenförmig oder zu einer Platte geschliffen, so läßt sich die Erscheinung mittels des Projektionsmikroskops objektiv machen. Zum Erzeugen der Ätzfiguren ist es sogar genügend, den Kristall über ein Blatt Filtrierpapier oder ein Stück Leder hinzuziehen, welches an einer Stelle benetzt ist.

Vermutlich ist die Ursache der Ätzfiguren Kontaktbewegung in der Lösung an den Stellen, wo dieselben auftreten.

Gelbes Blutlaugensalz, welches im Handel in großen Kristallen zu erhalten ist und sich leicht in Tafeln spalten läßt, gibt viereckige Eindrücke.

Fig. 2468 zeigt die Gestalt der Ätzfiguren bei Kalkspat, Fig. 2469 bei quadratischem Nickelsulfat (nach Blasius 1885).

Fig. 2468.

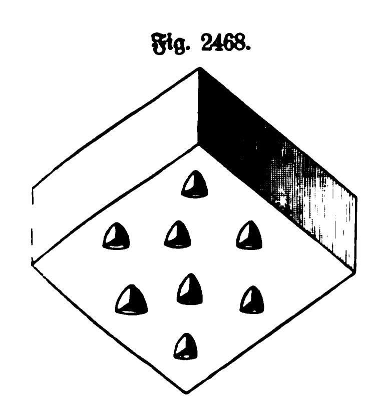
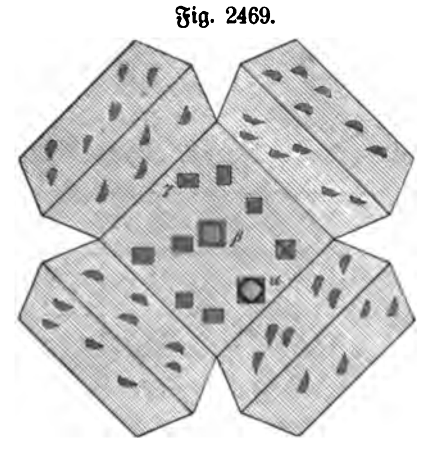


Fig. 2469.



183. **Schwere Flüssigkeiten.** Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Mineralien und zur Trennung der verschieden dichten Bestandteile eines Gemisches pulverförmiger Körper bedienen sich die Mineralogen einer sehr einfachen Methode. Man läßt den Körper in einer schweren Flüssigkeit schwimmen und verdünnt dieselbe so lange, bis der Körper beginnt unterzusinken, oder man gibt zu einer leichten Flüssigkeit, in welcher der Körper untersinkt, immer mehr von einer damit mischbaren schweren, bis er zu schwimmen beginnt. Sobald dies eintritt, weiß man, daß der Körper dasselbe spezifische Gewicht besitzt wie die Flüssigkeit, und die Aufgabe reduziert sich auf die einfachere der Bestimmung des spezifischen Gewichts der Flüssigkeit, welches, da man sich in allen Fällen derselben Flüssigkeit bedient, ein für allemal festgestellt, d. h. durch eine Formel ausgedrückt wird, welche lehrt, wie dasselbe aus den spezifischen Gewichten der Bestandteile zu finden ist. Man kann sich auch eine Anzahl Mischungen von bekanntem spezifischem Gewicht vorrätig halten und den Körper der Reihe nach, von der schwersten oder leichtesten beginnend, so oft eintauchen, bis eine Änderung seines Verhaltens eintritt. Das spezifische Gewicht desselben liegt dann zwischen dem der beiden zuletzt benutzten Flüssigkeiten. Endlich kann man auch das spezifische Gewicht der Flüssigkeit wieder dadurch finden, daß man feste Körper von bekanntem spezifischem Gewicht, vom leichtesten an beginnend, eintaucht, bis endlich einer untersinkt. Das spezifische Gewicht der Lösung liegt dann zwischen dem der beiden zuletzt benutzten Schwimmer (Indikatoren).

Das Prinzip dieser Methode der spezifischen Gewichtsbestimmung kann man

z. B. an einem in verdünnter Bittersalzlösung schwebenden, mit Blei beschwerten gefirnißten Holzkörper zeigen.

Fig. 2470.



Ein bekannter hierher gehöriger Versuch ist auch das schwebende Ei (Fig. 2470 [1]).

Als schwere Flüssigkeiten können Mischungen von Chloroform (1,52) oder Bromoform (2,9) benutzt werden. Ferner hat man folgende vorgeschlagen:

1. Thoulets Lösung (1879), bestehend aus einer Lösung von Quecksilberjodid in Jodkaliumlösung. Von verdünnteren Lösungen gelangt man zu konzentrierteren durch Eindampfen. Die konzentrierteste Lösung vom spezifischen Gewicht 3,196 enthält 539 g HgJ_2, 435 g KJ und 100 g H_2O. Das Maximum der Dichte hängt übrigens von der Temperatur und dem Feuchtigkeitsgehalte der Luft ab.

Die spezifischen Gewichte s für verschiedene gelöste Mengen der Jodide J sind:

s	J	s	J	s	J	s	J
3,196	289,83	2,6	208,02	2,0	128,28	1,4	50,63
3,0	262,32	2,4	181,21	1,8	102,17	1,2	25,20
2,8	235,06	2,2	154,63	1,6	76,28	1,0	—

J ist die Menge gelöster Jodide in 100 ccm Lösung.

Im Sommer ist das Maximum des spezifischen Gewichtes nicht 3,196, sondern 3,16. Als Übelstände werden bemerkt, daß die Lösung giftig ist und die Instrumente angreift.

2. Kleins Lösung. Zusammensetzung: $9WO_3, Bo_2O_3, 2CdO + 18aq$, d. h. Kadmiumwolframborat oder borowolframsaures Kadmium. Das spezifische Gewicht beträgt 3,281. Sie ist weniger giftig als die vorige und läßt sich relativ billig in größeren Mengen aus Natriumwolframat herstellen. Leider hat sie aber den Nachteil, daß sie Karbonate angreift, so daß ein Mineral, welches solche enthält, zunächst durch Behandeln mit verdünnter Essigsäure davon befreit werden muß. Durch Schmelzen des Salzes in seinem Kristallwasser kann man eine noch schwerere Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht 3,58 erhalten, welche indes keine Anwendung findet. Die Regenerierung der Lösung ist schwieriger, als bei der vorhergehenden und den folgenden.

3. Die Rohrbachsche Flüssigkeit ist eine Lösung von Baryumquecksilberjodid. 100 Tle. Jodbaryum und etwa 130 Tle. Jodquecksilber werden rasch abgewogen und in einem trockenen Kochfläschchen gut durcheinander geschüttelt; nach Zusatz von etwa 20 ccm destillierten Wassers bringt man das Ganze in ein auf etwa 150 bis 200° erhitztes Ölbad. Die Auflösung des Materials und Bildung des Doppelsalzes muß durch fleißiges Umrühren befördert werden. Nach vollständiger Lösung wird auf dem Wasserbade eingedampft, bis ein eingelegter Epidotkristall vom Sulzbachtal schwimmt. Beim Erkalten scheidet sich etwas gelbes Doppelsalz aus, trotzdem aber nimmt das Gewicht der Lösung infolge der Kontraktion derart

[1]) Siehe Donath, Physikalisches Spielbuch, Braunschweig 1902, Seite 117, Fig. 33.

zu, daß auf der kalten Lösung Topas schwimmt. Von dem gelben Doppelsalz trennt man die Lösung am besten durch Dekantieren oder durch Filtrieren durch Glaswolle. — Das spezifische Gewicht der Lösung ist 3,575 bis 3,588; sie ist eine vollkommen klare, sehr stark lichtbrechende gelbe Flüssigkeit, welche sich beim Erhitzen beträchtlich dunkler färbt. Sie siedet bei etwa 145° und gibt mit Wasserdämpfen rotes Quecksilberjodid ab. Ihr Ausdehnungskoeffizient ist ziemlich groß.

Beim Zusatz von Wasser scheiden sich Kristalle von rotem Quecksilberjodid aus, die kalt nicht wieder gelöst werden; zum Verdünnen der Lösung kann daher nur verdünnte Lösung benutzt werden, welche dadurch hergestellt wird, daß man in die fast bis zum Sieden erhitzte Lösung tropfenweise Wasser zufügt, oder besser, indem man in einem Glase über die konzentrierte Lösung vorsichtig eine Schicht Wasser bringt, worauf in einigen Stunden die Vermischung durch Diffusion ohne Ausscheidung vor sich geht. Das Mineralpulver darf nur vollkommen trocken angewendet werden.

Die Lösung eignet sich aus diesem Grunde weniger für leichtere, dagegen sehr gut für schwerere Mineralien.

4. Brauns schlägt eine Flüssigkeit vor, auf deren hohes spezifisches Gewicht bereits von Feußner aufmerksam gemacht worden ist, das Methylenjodid, CH_2J_2, spezifisches Gewicht = 3,33. Dasselbe muß anstatt mit Wasser mit Benzol verdünnt werden. Um die verdünnte Lösung wieder zu regenerieren, wird entweder das Benzol auf dem Wasserbade abgedampft, oder einfach durch Verdunstenlassen in einem offenen Gefäße entfernt oder rascher, indem man einen Luftstrom über die Flüssigkeit hinbläst.

Fig. 2471.

Hat sich die Lösung durch Erwärmen oder langes Stehen im Sonnenlicht gebräunt, so ist es nur nötig, dieselbe mit Kalilauge zu schütteln, mit reinem Wasser auszuwaschen, durch hineingeworfene Stücke von Chlorcalcium zu trocknen und zu filtrieren, um wieder die ursprüngliche, schwach gelblich gefärbte Flüssigkeit zu erhalten. Das spezifische Gewicht ändert sich mit der Temperatur in folgender Weise: bei 8° = 3,342, bei 16° = 3,3243, bei 33° = 3,289 (also Abnahme pro Grad = 0,00207), bei 74° = 3,189 (also Abnahme pro Grad = 0,00240). (Es ist zu beziehen von der chemischen Fabrik von E. Merck in Darmstadt zum Preise von 10 Mk. pro 100 g.)

Als Indikatoren[1]) schlägt Gisevius (1882) folgende vor:

Opal gelb (s = 1,94), Opal hell (2,10), Apophyllit (2,38), Quarz (2,61), Anorthit (2,71), Pollucit (2,81), Turmalin (2,98), Augit (2,97), Dioptas (3,25), Olivin (3,32). Die spezifischen Gewichte dieser Mineralien ermittelte er nach einem Verfahren, das schon von Phipson vorgeschlagen wurde, nämlich durch Einbringen

[1]) Max Kohl liefert 27 kugelförmige Indikatoren aus Glas nach Fig. 2471 zu 20 Mk.

des Körpers in einen Meßzylinder mit angesetztem sehr engem Rohr, in welchem die durch den Körper hervorgebrachte Volumenvermehrung gewissermaßen multipliziert zur Erscheinung kommt.

Anstatt eine etwas zu leichte Flüssigkeit durch Zusatz der schwereren schwerer zu machen, verwendet man zweckmäßiger Zusatz einer schwereren Mischung. Durch Abdestillieren kann man die Flüssigkeiten wieder auf die anfängliche Konzentration bringen.

184. Teilungskoeffizient. Interessant ist die Mischung mehrerer Flüssigkeiten, z. B. von Wasser, Äther und Alkohol. Je mehr Alkohol man zusetzt, um so mehr nimmt das Volumen der wasserreicheren Schicht zu, bis schließlich ein ganz homogenes Gemenge entsteht. Ebenso kann sich ein löslicher fester Körper zwischen zwei Lösungsmitteln teilen.

Unter Teilungskoeffizient wird verstanden das Verhältnis der räumlichen Konzentrationen (der Anzahl g pro ccm), mit welcher der dritte Stoff in den beiden Lösungsmitteln nach Eintritt des Gleichgewichtszustandes vorhanden ist. Beispielsweise verteilt sich Bernsteinsäure zwischen Äther und Wasser mit dem Teilungskoeffizienten 5,2, d. h. die Lösung in Äther enthält pro ccm 5,2 mal soviel Bernsteinsäure als die in Wasser.

Besitzt der gelöste Stoff in beiden Lösungsmitteln das gleiche Molekulargewicht, so ist der Teilungskoeffizient bei gegebener Temperatur konstant. Besitzt er dagegen in den beiden Lösungsmitteln verschiedenen Molekularzustand, wie z. B. bei Benzoesäure in Wasser und Benzol, wobei sich in letzterem Doppelmoleküle bilden, so ist (speziell in diesem Fall) das Verhältnis der Konzentration in Wasser zur Quadratwurzel aus der Konzentration in Benzol konstant.

Die Bedeutung des Teilungskoeffizienten kann am einfachsten durch Anwendung eines gefärbten Stoffes erklärt werden. Als praktische Anwendung kann etwa das „Ausschütteln“ von Brom aus wässeriger Lösung mit Äther oder Chloroform gezeigt werden.

Ferner ist hier die Osmose durch Flüssigkeitsschichten zu besprechen, z. B. bei Trennung von Wasser und Alkohol durch eine Schicht von Ricinusöl (Lhermite, 1854).

Schichtet man Chloroform, Wasser und Äther übereinander, so findet man, daß nach längerem Stehen der Äther fast vollständig durch das Wasser hindurch zu dem Chloroform gegangen ist, die Wasserschicht also in die Höhe gehoben wurde. Die Erscheinung erklärt sich dadurch, daß sich das Wasser an der Berührungsstelle mit Äther mit letzterem sättigt, dieser nun durch das Wasser diffundiert und schließlich vom Chloroform dem Wasser wieder entzogen wird, da er sich in Chloroform weit leichter löst als in Wasser. Es entsteht also ein konstanter Ätherstrom durch das Wasser, dessen Geschwindigkeit durch die Löslichkeit des Wassers für Äther bedingt ist. Ebenso geht in entgegengesetzter Richtung ein Chloroformstrom zum Äther, der aber sehr viel schwächer ist, da das Wasser weniger Chloroform aufnimmt. Die Bewegung hört erst auf, wenn über und unter dem Wasser Äther und Chloroform in gleicher Mischung vorhanden sind.

185. Tröpfchenniederschläge. Mischt man Öl und Alkohol und bringt sodann Wasser hinzu, so muß sich das Öl ausscheiden, da es in Wasser nicht löslich ist.

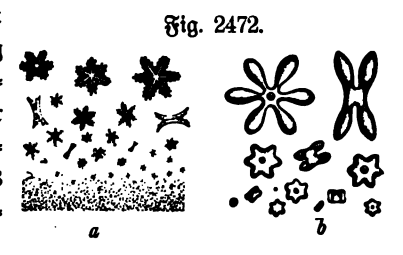
Unter Umständen kann der Sättigungspunkt etwas überschritten werden (Übersättigung), falls nämlich Kondensationskerne (Staubpartikelchen), an welche sich die Öltröpfchen ansetzen könnten, nicht vorhanden sind.

186. Physikalische kristallinische Niederschläge. Die Bildung von Kristallen durch Beimischen einer Flüssigkeit, in welcher sich der Körper nicht löst, kann im großen gezeigt werden, z. B. mit konzentrierter Lösung von schwefelsaurem Kupferoxydammoniak, über welche man Alkohol aufschichtet, worauf man dann das Ganze längere Zeit sich selbst überläßt.

Mit Hilfe des Projektionsmikroskopes kann man z. B. Niederschläge von Campher aus alkoholischer Lösung durch Wasser (Fig. 2472), das Fällen verschiedener Salze durch Zusatz von Alkohol demonstrieren, doch sind die erhaltenen Kristalle ziemlich klein.

Unter Umständen kann man auf diese Art auch die Entstehung von Übersättigung demonstrieren, sowie die Bildung minder übersättigter Höfe in der Nähe wachsender Kristalle. Letztere werden z. B. bei Kristallisation von Kupfervitriol in einem Reagenzglas auch durch die von den Kristallen aufsteigenden Schlieren erkennbar.

Fig. 2472.



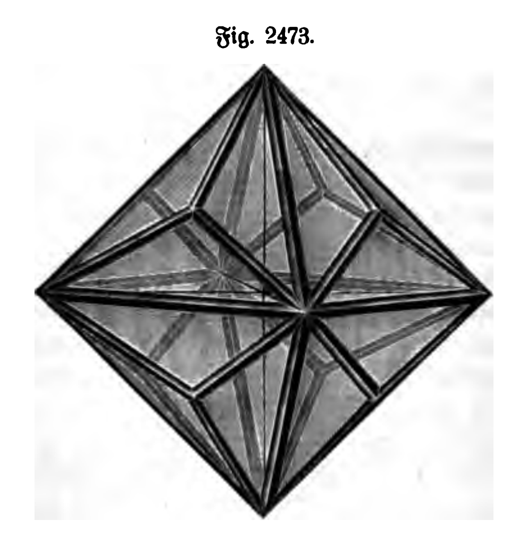
187. Absorption. Übersättigung tritt auf, wenn Kristallisationskerne fehlen, welche durch die Kraft der Absorption den gelösten Körper zur Ausscheidung zwingen. Daß eine solche Kraft der Absorption existiert, kann z. B. nachgewiesen werden, indem man feinen Sand in eine konzentrierte aber nicht übersättigte Salzlösung bringt oder die Salzlösung durch feinen Sand filtriert. Dabei ändert sich die Konzentration derselben, wie durch Bestimmung des spezifischen Gewichts festgestellt werden kann.

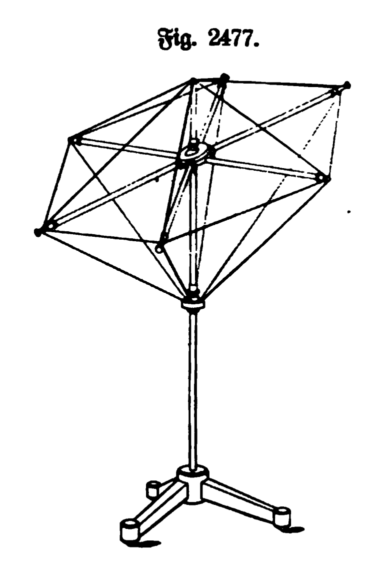
Frisch ausgeglühte Tierkohle, noch warm auf ein Filter gebracht und mit Rotwein, Lackmustinktur, roten Fruchtsäften u. dergl. übergossen, macht diese Flüssigkeiten fast völlig farblos, falls die Quantität der Kohle hinreichend groß ist. Daß auch Salze absorbiert werden, läßt sich nach Heumann derart zeigen, daß man Lösung von Bleinitrat so weit verdünnt, daß mit Schwefelwasserstoffwasser eben noch ein deutlicher Niederschlag entsteht. Behandelt man diese Lösung mit Tierkohle und wiederholt die Prüfung mit Schwefelwasserstoff, so entsteht kein Niederschlag mehr.

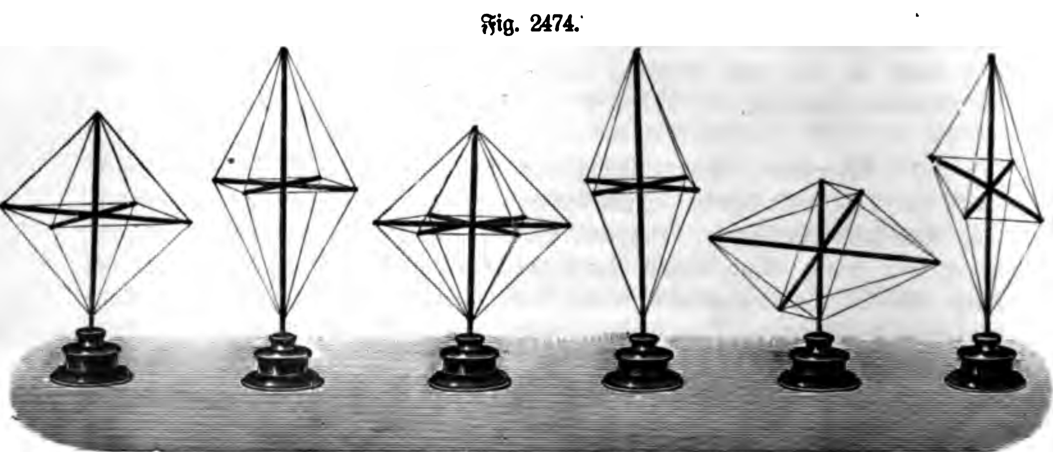
Als die Kraft, welche die Moleküle zu regelmäßiger Zusammenlagerung in Form von Kristallen zwingt, ist ebenfalls die Absorptionskraft zu betrachten.

188. Die Kristallformen. Modelle der Kristalle kann man sich aus leicht zu schnitzenden Substanzen, z. B. Stearin, Kartoffeln u. s. w., mit einiger Fertigkeit rasch in unendlicher Mannigfaltigkeit herstellen[1]). Dauernde Modelle klebt man aus Pappe zusammen, nachdem man sich die einzelnen Seitenteile genau ausgeschnitten hat. Zur Erleichterung dieser Arbeit dienen die sogenannten Netze zu Kristallformen,

[1]) Einen Apparat zur Herstellung solcher Modelle liefert V. Goldschmidt, Zeitschr. f. Kristallographie 31, 233, 1899.


Fig. 2473.


Fig. 2477.


Fig. 2474.

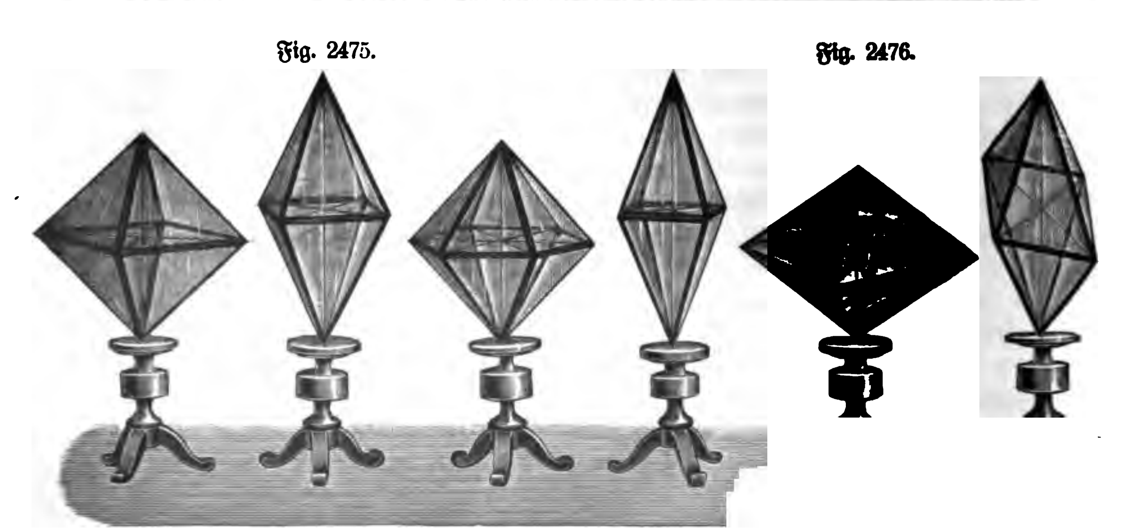

Fig. 2475.

Fig. 2476.

d. h. Zeichnungen der polygonalen Umgrenzungen der Seitenteile, welche im Buchhandel zu beziehen sind [1]).

Hier können auch das Anlegegoniometer, sowie die Kreisteilmaschine demonstriert werden [2]).

Eine Sammlung künstlicher Kristalle liefert C. Goldbach, chemisches Laboratorium in Heidelberg zu 20 bis 30 Mk. (Alaun, bromsaures Natrium, Bleisalpeter, Natronsalpeter, doppeltphosphorsaures Ammonium und Kalium, doppelt-



Fig. 2478. Fig. 2479.



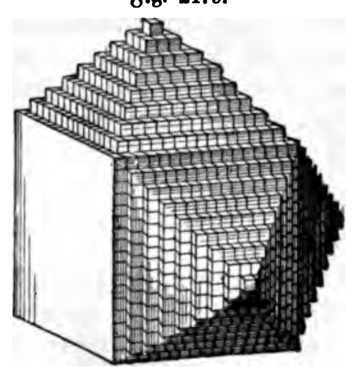
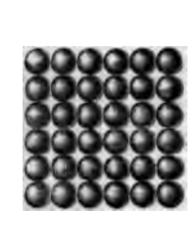
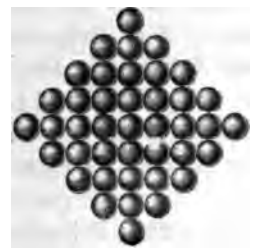
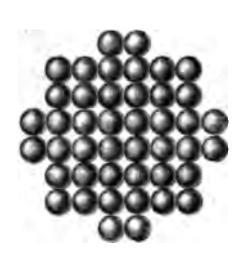


Fig. 2480.







arsensaures Ammonium und Kalium, schwefelsauren Nickel + 6 aq., Schwefel, schwefelsaures Kalium, Chlorbaryum, Nickelvitriol, Bittersalz, schwefelsaures Magnesium-Nickel,

---

[1]) Netze zum Anfertigen zerlegbarer Kristallmodelle von Dr. Waege, 1890, sind zu haben in R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, Berlin SW., Schönebergerstraße 26. Über einen Apparat zur Demonstration der Kristallformen siehe ferner R. J. Anderson, Phil. Mag. 28, 127—132, 1889. Leybolds Nachf. in Köln liefern Modelle nach Fig. 2473 aus Glasplatten zu 2 bis 5 Mk. Die Kanten sind mit farbigem Kaliko bezogen und haben eine durchschnittliche Größe von 16 bis 27 cm. Die Achsen sind durch Seidenfäden markiert, wobei die Hauptachsen mit gleicher, die Nebenachsen mit ungleicher Färbung ausgeführt sind. Von Leppin u. Masche, Berlin SO., Engelufer 17, sind Achsenkreuze nach Fig. 2474 zu 21 Mk. und Kristallmodelle nach Fig. 2475 u. 2476 zu 13,5 bis 25,5 Mk. zu beziehen. Ein verstellbares Achsenkreuz nach Nestler (Z. 12, 124, 1899) liefert F. Hugershoff, mech. Werkstatt in Leipzig, zu 20 Mk. (Fig. 2477). Dasselbe gestattet Oktaeder (Pyramiden) aller sechs Kristallsysteme darzustellen und zwar sowohl spitze wie stumpfe und auch dieselben auf einfache Weise ineinander überzuführen. Kristallmodelle aus Holz und Glas kann man in den verschiedensten Formen beziehen von Steeg u. Reuter in Homburg, Dr. A. Krantz in Bonn, Joh. Umann, Glasraffinerie, Tiefenbach bei Dessendorf i. B. u. a. — [2]) Ein Anlegegoniometer nach Fig. 2478 zum Messen der Winkel an Kristallmodellen u. s. w. liefern Leybolds Nachf. in Köln zu 60 Mk. Vergl. auch Bd. I (1) S. 382, 604 und (2) S. 8.

Brechweinstein, Seignettesalz, gelbes Blutlaugensalz, rotes Blutlaugensalz, schwefelsaures Magnesium-Ammonium und ähnliche Doppelsalze, Kupfervitriol und Kaliumbichromat).

Raumgittermodelle kann man sich leicht aus Holzklötzchen oder Kugeln und durchgesteckten steifen Drähten herstellen[1]) (Fig. 2479 und 2480).

Als große Demonstrationskristalle eignen sich Steinsalz, Blutlaugensalz, Kupfervitriol, Bergkristall, Gips, Glimmer.

Die Versuche über Kristallisation lassen sich mittels des in Bd. I (1), S. 220, § 44 beschriebenen Projektionsmikroskops objektiv machen. Bezüglich des Näheren sehe man O. Lehmann, Molekularphysik, Leipzig 1889 und Flüssige Kristalle, 1904.

Anstatt die Fällung durch Alkoholzusatz u. dergl. zu bewirken, verwendet man bei Demonstration zweckmäßiger Abkühlung der heiß gesättigten Lösung (natürlich ohne davon zu sprechen).

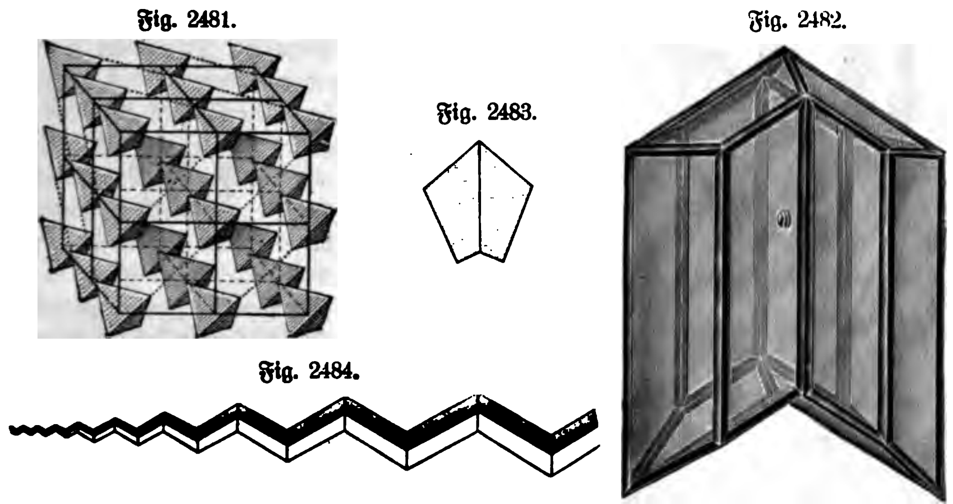
Als Demonstrationsobjekt ist namentlich α-naphtylaminsulfosaures (naphtionsaures) Natrium[2]) zu empfehlen. Man reinigt es vor dem Gebrauch zweckmäßig durch wiederholtes Umkristallisieren.

189. Die Ergänzung verletzter Kristalle[3]). Bringt man einen kugelförmig zugeschliffenen oder gefeilten Kristall (z. B. von Alaun) in gesättigte Lösung und bewirkt allmähliches Weiterwachsen, so treten alsbald da und dort Ecken hervor und bald ist die normale Polyedergestalt wieder unverändert ausgebildet. Zur Demonstration bringt man einen Tropfen Lösung von naphtionsaurem Natrium auf einen Objektträger, fügt einige Körnchen des Salzes hinzu und bedeckt mit einem flachen Uhrglase, die konkave Seite nach oben. Das Präparat wird auf den Tisch des Projektionsmikroskops gebracht und schwach erwärmt. Die Körnchen lösen sich dabei teilweise auf und runden sich ab. Beim Erkalten erscheinen alsbald überall auf den gleichmäßig gekrümmten Flächen Ecken, die rasch weiter wachsen, bis die ebenflächig begrenzte normale Form der Kristalle wieder erreicht ist.

190. Der Kristallhabitus. An großen Kristallen zeigt sich eine beträchtliche Änderung des Habitus insbesondere bei Kalkspat. Man könnte also eine Serie gleich orientiert aufgestellter Kalkspatkristalle, eventuell von Modellen vorzeigen. Will man die Änderung des Habitus je nach den Umständen der Kristallisation direkt vorführen, so dürften hierzu insbesondere mikroskopische Präparate geeignet sein. So z. B. kristallisiert Phtalsäure aus heißer Lösung in Terpentinöl auf dem Objektträger des Mikroskops, so lange die Lösung noch heiß ist, in fast oktaederähnlichen Kristallen. Dieselben verlängern sich aber alsbald nach einer Richtung ganz unverhältnismäßig stark und werden dadurch nadelartig.

[1]) Über Sohnckes Modelle der regelmäßigen Punktsysteme sehe man Sohncke, Entwickelung einer Theorie der Kristallstruktur, Leipzig 1879. Eine Sammlung der von Sohncke selbst hergestellten Modelle dieser regelmäßigen Punktsysteme befindet sich im Karlsruher physikalischen Institut. Ferner sei hingewiesen auf Baumhauer, Darstellung der 32 möglichen Kristallklassen auf Grund der Deck- und Spiegelachsen, nebst Beschreibung von Achsenmodellen zur Demonstration der Symmetrieverhältnisse der Kristalle, Leipzig 1899, W. Engelmann; Groth, Physikalische Kristallographie und Einleitung in die kristallographische Kenntnis der wichtigeren Substanzen, Leipzig 1894, W. Engelmann; Liebisch, Grundriß der physikalischen Kristallographie, Leipzig 1896, Veit u. Co. — [2]) Zu beziehen von E. Merck in Darmstadt. — [3]) S. a. Rauber, Die Regeneration der Kristalle, Leipzig 1895, 1896, G. Thieme.

191. Hemimorphie. Zur Demonstration mittels des Kristallisationsmikroskops eignet sich z. B. Triphenylmethan. Bei den Modellen, welche Leybolds Nachf. in Köln liefern, werden die hemiedrischen und hemimorphen Formen, um ihre Ableitung aus den holoedrischen nachzuweisen, auch in der Art angefertigt, daß der zugehörige Vollflächner aus Karton eingeschlossen wird, dessen Flächen je nach dem Verschwinden oder Bleiben durch ungleiche Farben markiert sind. Fig. 2481 zeigt ein Raumgittermodell der Tetartoedrie nach Violle.


Fig. 2481. Fig. 2482. Fig. 2483. Fig. 2484.

192. Zwillingsbildung. Es gibt zahllose Substanzen, die leicht in Zwillingen auftreten, bei manchen hält es sogar schwer, einfache Individuen zu erhalten. So sind beispielsweise, wie in Lehrbüchern der Mineralogie näher beschrieben, die meisten Quarzkristalle Zwillinge. Zur Demonstration dürfte vorzugsweise Chlorbaryum geeignet sein, dessen Lösung man durch Zusätze von etwas arabischem Gummi verdickt und offen verdunsten läßt. Ein Modell zeigt Fig. 2482 (Lb, 5).

Meist sind die Zwillinge einfache (Fig. 2483), welche durch die einspringenden Winkel leicht als solche erkennbar sind, doch kommt auch vor, daß sich die Zwillingsbildung wiederholt, wie Fig. 2484 zeigt; es entstehen polysynthetische Zwillinge mit vielen einspringenden Winkeln.

193. Oberflächenspannung von Kristallen. Da zwischen den festen und flüssigen Stoffen ein stetiger Übergang vorhanden ist, also auch Kristalle denkbar sind, deren Elastizitätsgrenze nahezu oder vollständig gleich Null ist, so wird man bei solchen ähnliche Wirkungen der Oberflächenspannung erwarten können, wie sie oben S. 836 bei frei schwebenden Öltropfen beschrieben wurden. In der Tat gibt es solche fließenden und flüssige Kristalle[1]).

Ein leicht zugängliches und mittels des Kristallisationsmikroskops für Projektion leicht zu demonstrierendes Objekt ist die sirupartige Modifikation von ölsaurem Ammoniak. Ohne weiteres sind allerdings die Kristalle, da sie nahezu den gleichen Brechungsexponenten wie die Lösung haben, fast nicht sichtbar. Man kann sie wesentlich deutlicher hervortreten lassen, indem man sie mit Magdalarot färbt, wozu es notwendig ist, die Löslichkeit dieses Farbstoffs in Alkohol (welcher zweckmäßig

[1]) Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann.

als Lösungsmittel benutzt wird) durch Zusatz von etwas Mandelöl zu vermindern. Noch einfacher ist die Demonstration zwischen gekreuzten Nicols, welche freilich an dieser Stelle nicht gut benutzt werden kann. Weniger gut eignet sich die Färbung der Lösung mit Farbstoffen, welche von dem Kristall nicht aufgenommen werden, z. B. Anilinblau, wobei diejenigen Kristalle, welche den ganzen Zwischenraum zwischen Objektträger und Deckglas ausfüllen, weiß auf blauem Grunde erscheinen.

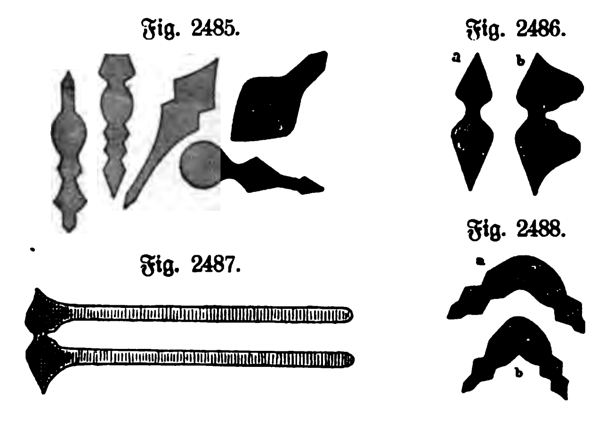

Fig. 2485. Fig. 2486. Fig. 2487. Fig. 2488.

Fig. 2485 zeigt einige der gewöhnlich zu beobachtenden Formen. Deformiert man einen solchen Kristall z. B. durch Verschieben des Deckglases über den Objektträger, wie die Fig. 2486 a und 2486 b andeuten, so kehrt derselbe beim Nachlassen der Kraft wieder zu seiner ursprünglichen Form zurück. Bei sehr starker Deformation, wie bei Fig. 2487, ist allerdings die Lage des Kristalls nicht mehr die ursprüngliche, da sich infolge erzwungener Homöotropie die Moleküle entsprechend der Richtung der Zerrung anordnen. Wird ein Kristall, wie Fig. 2488 a andeutet, gebogen, so kehrt er beim Nachlassen der Kraft ebenfalls wieder in seinen Anfangszustand zurück, falls nicht eine bestimmte Grenze überschritten wurde, bei der eine Art Bruch eintritt und der Kristall nunmehr in zwei Individuen zerfällt, die sich in Zwillingsstellung befinden und in dieser Art der Zusammenlagerung im Gleichgewicht sind (Fig. 2488 b).

194. Fließende Kristalle. Kommen zwei frei schwebende Kristalle von ölsaurem Ammoniak, wie Fig. 2489 andeutet, an einem Punkt in Berührung, so fließen sie dort zusammen und das Zusammenfließen dauert fort bis aus den beiden Individuen ein einziges von normaler Form und Struktur geworden ist.

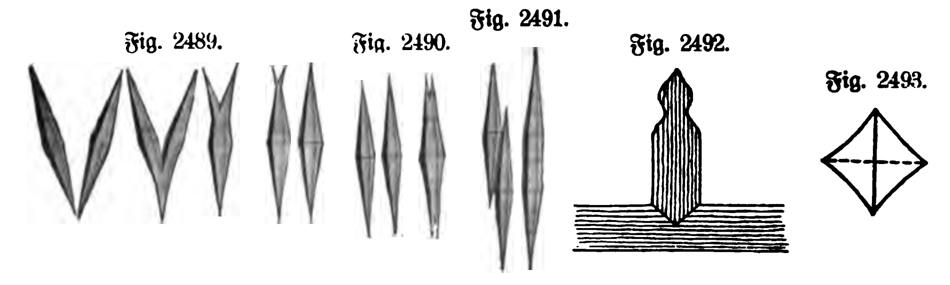
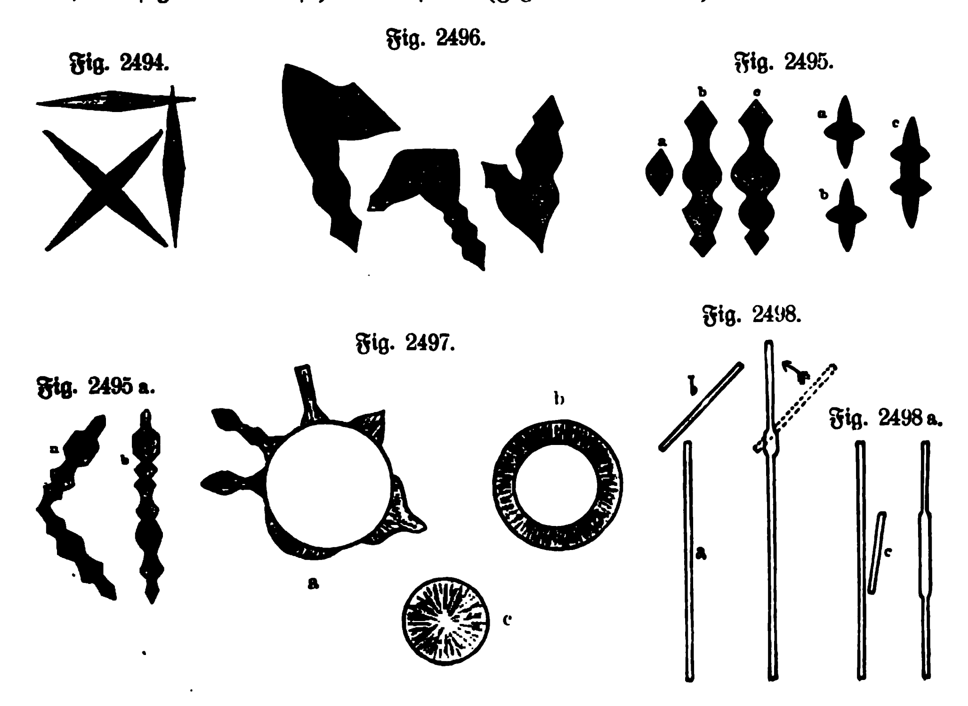

Fig. 2489. Fig. 2490. Fig. 2491. Fig. 2492. Fig. 2493.

Fig. 2490 deutet das Zusammenfließen an für den Fall paralleler Kristalle, Fig. 2491 für den Fall paralleler Kristalle in ungleicher Höhe. Treffen die Kristalle unter einem Winkel von 90° zusammen, wie bei Fig. 2492 bis 2494, so tritt keine Parallelrichtung beim Zusammenfließen ein, sondern sie verharren in Zwillingsstellung.

Infolge des fortwährenden Zusammenfließens kleiner Kristalle zu größeren, entstehen die in Fig. 2495 und 2495 a dargestellten gezackten Formen oder Zwillinge wie Fig. 2496. Auch für diese äußerlich unregelmäßig geformten Komplexe gilt natür-

lich gleiches und die wohl für sich verständlichen Figuren zeigen verschiedene Fälle des Zusammenfließens von solchen.

Kommt ein Kristall mit der Spitze in Berührung mit einer Luftblase, so verbreitert er sich zu einer Pyramide oder Linse, wie Fig. 2497 a zeigt, und durch Zusammenfließen zahlreicher solcher Kristalle an einer Luftblase kann ein ringförmiger oder hohlkugelförmiger Kristall entstehen, eventuell, wenn die Blase verschwindend klein, ein sogenannter Sphärokristall (Fig. 2497 b und c).



Ein weitaus geeigneteres Präparat als ölsaures Ammoniak ist der p-Azoxybenzoesäureäthylester mit einer Spur Kolophonium als Lösungsmittel versetzt, insofern die fließenden Kristalle desselben (lange dünne tetragonale Prismen) infolge starker Verschiedenheit ihres Brechungsexponenten von dem der Lösung ohne weiteres deutlich sichtbar sind.

Die Fig. 2498 und 2498 a zeigen zwei Beispiele des Zusammenfließens solcher Kristalle, die Fig. 2499 die Ausbreitungen an einer Luftblase.

Cholesterylbenzoat, gelöst in Kolophonium, bildet fließende Kristalle von ellipsoidischer oder cylindrischer Form mit spitzen Enden, wie Fig. 2500 zeigt. Hier ist also die Oberflächenspannung im stande, wenigstens in Richtungen senkrecht zu der Achse die Bildung polyedrischer Form zu verhindern. Vollkommen flüssig sind Kristalle von Azoxyanisol, welche durch die Oberflächenspannung, falls sie in einer spezifisch gleich schweren Flüssigkeit schweben, ähnlich wie Öltropfen zu vollkommenen Kugeln abgerundet werden. Daß indes diese Kugeln noch eine regelmäßige innere Struktur besitzen, kann man daran erkennen, daß sie anisotrop sind bezüglich der Reibung. Dies macht sich dadurch geltend, daß sie in strömender Flüssigkeit alle im gleichen Sinne rotieren. Ein Modell zur Erläuterung der Ursache dieser Rotation zeigt Fig. 2501. Es ist eine Kugel aus Blech mit geriefter Oberfläche, die

Fig. 2499.

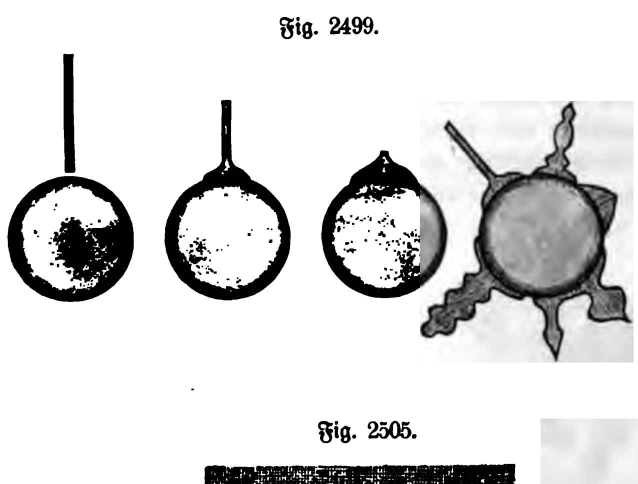


Fig. 2504.



Fig. 2500.

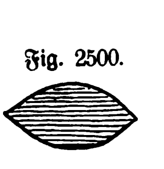


Fig. 2505.

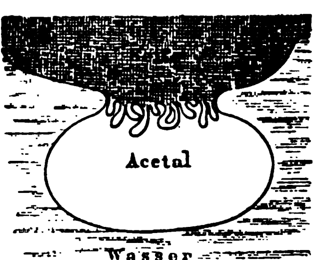
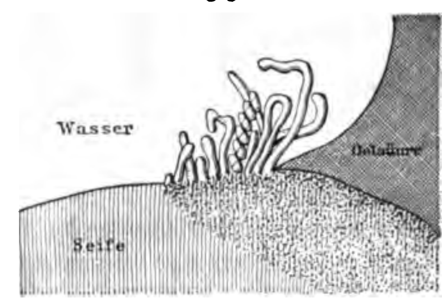


Fig. 2501.

Fig. 2503.



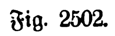
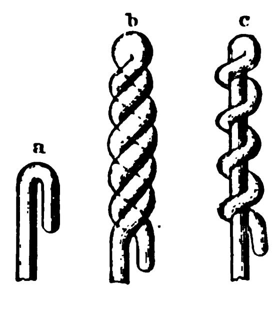


Fig. 2502.



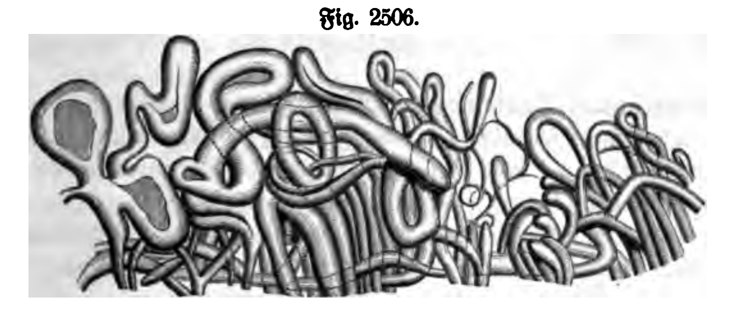
sich auf einer Spitze leicht drehen kann und kontinuierlich rotiert, wenn man aus der darüber befindlichen Brause Wasser darüber leitet.

195. Myelinformen. Bringt man nach Famintzin (1885) unter dem Mikroskop einen Tropfen käuflicher Ölsäure in Berührung mit wässerigem Ammoniak, so bilden sich höchst merkwürdige wurstförmige Auswüchse, die sich häufig ähnlich wie eine gedrehte Schnur zopfartig tordieren und lebhaft an organische Bildungen, z. B. Pilzfäden, erinnern.

Diese sogenannten Myelinformen sind nichts anderes

als fließende Kristalle und die Ursache ihrer eigentümlichen Gestaltung Differenzen der Oberflächenspannung an verschiedenen Stellen, welche wie z. B. bei halb begrenzten Tropfen u. s. w. die Ursache der auftretenden Kontaktbewegung sind. Verschiedene Fälle der Bildung sind dargestellt in den Fig. 2502 und 2503 bis 2506.

Fig. 2506.



196. Kristallisationskraft. Stellt sich einem wachsenden Kristall ein kleines Hindernis entgegen, z. B. ein Stückchen eines festen Körpers, so stellt der Kristall nicht, wie man erwarten sollte, sein Wachstum ein, wenn er auf das Hindernis auftrifft, sondern schiebt dasselbe vor sich her. Es wird also in den engen Raum zwischen Kristall und Hindernis mit nicht unbeträchtlicher Kraft Flüssigkeit eingesogen.

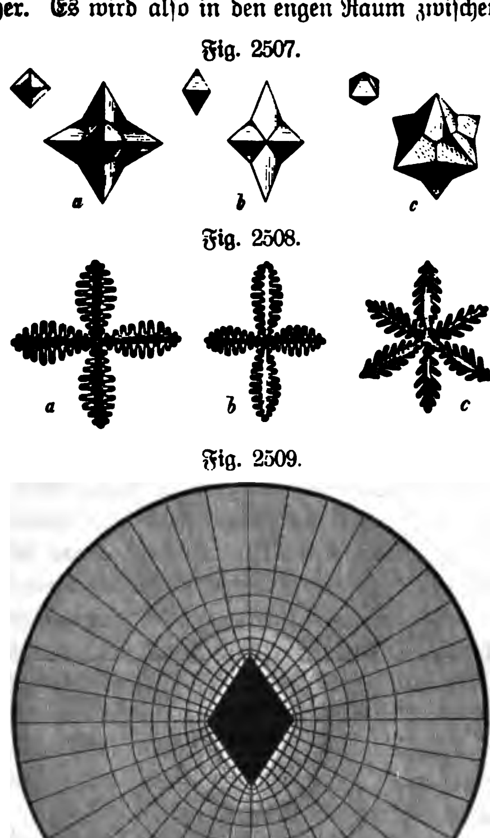


Fig. 2507. Fig. 2508. Fig. 2509.

Man kann die Wirkungen dieser Kraft z. B. bei porösen Tonzellen galvanischer Batterien beobachten, in deren Poren sich, falls sie nicht gereinigt wurden, Zinkvitriolkristalle bilden, die den Ton zersprengen. Löst man Chlorkalium in heißer Kieselsäurelösung, läßt diese gelatinieren und wartet die Ausscheidung von Kristallen ab, so sieht man diese auf der Oberfläche der Gallerte in die Luft hinein wachsen, indem sie sich selbst emporheben. Salmiak mit Chlorkadmium heiß gelöst, scheidet beim Erkalten Kristalle ab, die über die Oberfläche der Flüssigkeit hinaus wachsen. (Effloreszenz.)

197. Die Skelettbildung zeigt man mittels des Projektionsmikroskops am besten bei heiß gesättigter und im Abkühlen begriffener Lösung von Salmiak in Wasser. Man bringt auf einen Objektträger eine kleine Quantität fein pulverisierten reinen Salmiak und dazu so viel Wasser,

daß beim Erwärmen das Salmiakpulver sich gerade vollständig auflöst, bedeckt mit einem flachen Uhrglase, die konkave Seite nach oben, und läßt nun unter dem Mikroskop abkühlen. (Fig. 2507, 2508.)

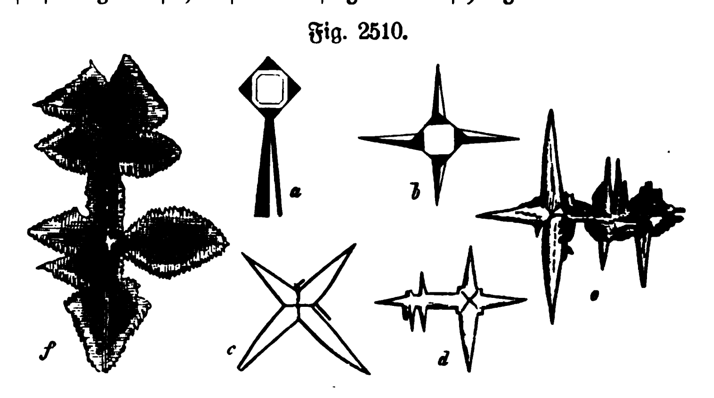
Den Verlauf der Linien gleicher Konzentration, Niveauflächen und Stromlinien kann man an der Hand der Tafeln für elektrische Niveau- und Kraftlinien erklären (Fig. 2509).

198. Getrennte Kristallisation und Mischkristalle. Daß Kristalle verschiedener Substanzen aus einem Gemisch der Lösungen sich im allgemeinen getrennt ausscheiden, kann man z. B. sehen bei gleichzeitiger Kristallisation von Kupfervitriol und doppelchromsaurem Kali.

Löw (1888) empfiehlt, in einem Reagenzglas Kupfervitriol und Alaun zu lösen. Beim Abkühlen schießen die blauen Kupfervitriolkristalle getrennt von den Alaunkristallen an.

Die Bildung isomorpher Mischungen kann man sehr gut bei gewöhnlichem Alaun und Chromalaun sehen. Zur Demonstration mit Hilfe des Projektionsmikroskops eignen sich besonders folgende Mischungen:

Fig. 2510.



1. Salmiak mit Eisenchlorid. Die Lösung muß mit Salzsäure angesäuert werden und der Zusatz von Eisenchlorid darf nur so groß sein, daß eben noch reguläre würfelförmige Kristalle entstehen. Man erhitzt, bis fast aller Salmiak, dessen Menge man durch einige Vorversuche ausprobieren muß, sich gelöst hat und läßt nun abkühlen. Sind noch einige Fragmente von reinem Salmiak vorhanden, so sieht man, wie diese farblosen Körper bei weiterschreitender Abkühlung sich allmählich mit einer farbigen Rinde umgeben.

2. Salmiak mit (etwa gleich viel) Kobaltchlorür und einer Spur Kadmiumchlorid. Die Lösung (in reinem Wasser) muß heiß gesättigt sein, sie erscheint dann blau. Beim Abkühlen bilden sich rosenrot gefärbte Würfel von Salmiakmischkristallen, gleichzeitig wird die umgebende Lösung fast farblos.

3. Salmiak mit Nickelchlorür und einer Spur Kadmiumchlorid. Die Lösung wird unter Zusatz von etwas Salzsäure heiß gesättigt, beim Abkühlen bilden sich grün gefärbte Würfel.

4. Salmiak mit Roseokobaltchlorür. Die Lösung nimmt von letzterem Salze nur sehr wenig auf, nichtsdestoweniger bemerkt man aber die Aufnahme der fremden Substanz an der eintretenden Verzerrung der Salmiakskelette. Bei Kristallisation im großen kann man auch sehr deutlich rosa gefärbte Würfel erhalten.

5. **Salmiak mit wenig Kupferchlorid.** Die Lösung, mit etwas Salzsäure angesäuert, scheidet, solange sie noch heiß ist, Salmiakkristalle aus, an diese setzen sich beim Abkühlen in regelmäßiger Stellung tetragonale Kriställchen des Doppelsalzes Kupferchlorid-Chlorammonium an.

6. **Salmiak mit viel Kupferchlorid.** Die gleichfalls angesäuerte Lösung scheidet zunächst fein zugespitzte Nadeln von Kupferchlorid aus, an welche sich nach einiger Zeit ebenfalls Doppelsalzkristalle ansetzen, wobei sich gewöhnlich unregelmäßige Klumpen bilden. Nach Erwärmen und Wiederabkühlen treten die Nadeln in sternförmigen Aggregaten auf (Fig. 2510).

199. Löslichkeit von Mischkristallen. Durch Auflösung von Mischkristallen (z. B. von gewöhnlichem Alaun und Chromalaun) erhält man genau dieselbe Flüssigkeit, wie durch Mischung der Lösung ihrer Komponenten. Diese Tatsache ist insofern von besonderer Wichtigkeit, als es unmöglich ist sie zu beschreiben, ohne die Vorstellungen der Molekulartheorie zu Hilfe zu nehmen. Man müßte nämlich unendlich viel neue Bezeichnungen einführen, was praktisch unmöglich ist.

Befindet sich ein Mischkristall in konzentrierter Lösung und bringt man in dieselbe Lösung außerdem Kristalle der reinen Komponenten, so werden letztere allmählich „aufgezehrt", während der Mischkristall weiter wächst, d. h. letzterer besitzt geringere Löslichkeit, oder die Löslichkeit eines reinen Kristalls wird durch eine fremde Beimischung vermindert. Ist kein Mischkristall anwesend, so kommen die Kristalle der beiden reinen Substanzen mit der Lösung ins Gleichgewicht. Dieses Gleichgewicht wird aber alsbald gestört, sobald sie sich in einem Punkte berühren. Dieser Punkt verhält sich wie ein Mischkristall, es schlägt sich also dort Mischsubstanz nieder und die reinen Kristalle werden allmählich aufgezehrt.

200. Die Trichitenbildung. Diese durch Aufnahme nicht isomorpher Beimischungen bedingte eigentümliche Störung des Kristallwachstums läßt sich sehr gut verfolgen bei Mekonsäure, welche durch Zusatz von Methylviolett gefärbt wird. Die aus der heißgesättigten Lösung in Wasser sich ausscheidenden Kristalle sind anfänglich noch farblos, nehmen aber mit sinkender Temperatur immer intensivere Farbe an, wobei sie sich gleichzeitig in dünne, immer mehr sich verzweigende gekrümmte Lamellen aufblättern, so daß schließlich ganz unregelmäßige Aggregate entstehen. In anderen Fällen entstehen äußerst feine haarförmige Kristalle (Trichiten).

Der außerordentlichen Feinheit der Trichiten halber ist die Demonstration einigermaßen schwierig. Am besten dürfte sich wohl Orthoquecksilberditolyl, aus heißem Terpentinöl kristallisiert, eignen, oder ein Niederschlag von pikrinsaurem Kali dadurch erzeugt, daß man ein Tröpfchen Pikrinsäurelösung unter einem Uhrglase (die konkave Seite nach oben) auf einen Objektträger bringt und nun einen Tropfen Kalilösung herumfließen läßt.

Die meisten Trichiten nehmen bei ihrer Entstehung eine mehr oder minder beträchtliche Krümmung an, bei der allmählichen Verdickung strecken sie sich dann gerade oder erhalten Risse und zerbrechen in mehrere Teile.

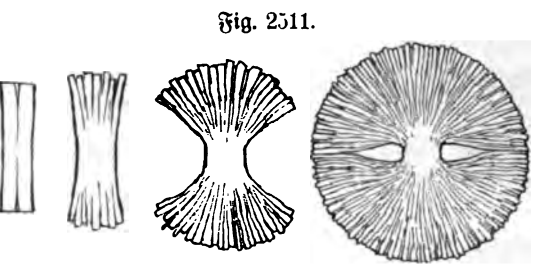
Die Ursache der Trichitenbildung kann aber auch eine andere sein, z. B. bei Trichiten von Styphninsäure. Man bringt eine kleine Quantität der Substanz in fein gepulvertem Zustande auf einen Objektträger, tröpfelt etwas Benzol auf, erwärmt, bringt dann noch Wasser (etwa die doppelte oder dreifache Quantität des

Benzols) hinzu und erwärmt abermals. Einige unaufgelöste Körnchen von Styphninsäure müssen noch übrig sein. Tritt nun Abkühlung ein, so setzen sich alsbald an diese Fragmente sehr feinstrahlige Trichiten an, welche gewöhnlich in parallelstrahligen, gegeneinander unter 90 oder 60° geneigten Büscheln auftreten und allmählich das Gesichtsfeld derart überziehen, als ob es mit Spinnennetzen bedeckt würde. Da und dort sieht man plötzlich einzelne Trichiten ihre Wachstumsrichtung ändern und nach einer um 90 oder 60° dagegen geneigten Richtung weiter wachsen. Bei ganz genauer Beobachtung findet man am Ende jedes Trichiten ein feines Benzoltröpfchen.

201. Die Trägheit der Trichiten. Trichiten zeigen gegen Verdickung ein eigentümliches Widerstreben. Es kann der Fall sein, daß ein trichitisch ausgebildeter Kristall und ein großer von gewöhnlicher Form über Kreuz aufeinander liegen und dabei der große rasch wächst, während der Trichit kaum merklich zunimmt und schließlich von dem großen Kristall umwachsen wird. Die Verdickung der Trichiten beginnt häufig an einem Ende und schreitet von hier aus rasch weiter, bis schließlich aus dem Trichiten ein gewöhnlicher Kristall entstanden ist. Man beobachtet dies z. B. bei inaktivem, saurem, äpfelsaurem Ammoniak, welches man auf dem Objektträger eines Mikroskops aus heißer wässeriger Lösung kristallisieren läßt.

202. Die Sphärolithenbildung. Wie erwähnt, erhalten gekrümmte Kristalle bei der Verdickung in der Regel Risse und Sprünge. Jeder solche Riß wird dann zum Ausgangspunkte neuer Kristalle, die dem ursprünglichen nicht ganz parallel stehen, es entsteht eine büschelartige Verzweigung und durch vielfache Wiederholung des Vorganges entstehen schließlich zentralfaserige Aggregate, deren Fasern alle gleiche Länge annehmen, so daß bei hinreichend dicht gedrängten Fasern ein kugeliges Gebilde entsteht (Fig. 2511).

Fig. 2511.



Ein hübsches Demonstrationsobjekt solcher Sphärolithen ist Benzoin mit etwas Kolophonium. Man bringt eine geringe Menge desselben auf einen Objektträger, erhitzt bis zum Schmelzen, bedeckt mit einem gewöhnlichen Deckglase und läßt rasch erstarren. Je nach der Schnelligkeit der Abkühlung erhalten die Sphärolithen verschiedene Größe. Es bilden sich außerdem zwei verschiedene Arten, da die Substanz zwei verschiedene Modifikationen besitzt. Mit Hilfe eines gewöhnlichen Projektionsapparates lassen sich die Sphärolithe z. B. bei Kupfernitrat zeigen.

203. Chemische Verbindung von Flüssigkeiten. Ein zur Projektion geeigneter Versuch besteht in folgendem. Man füllt einen Glastrog mit parallelen Wänden mit verdünnter Lackmustinktur, bis die Flüssigkeit purpurblau erscheint und projiziert denselben. Nun bringt man einige Tropfen sehr verdünnter Säure hinzu. Auf der Wand zeigt sich ein schöner Sonnenuntergang mit Wolken in verschiedenen Färbungen [1]).

[1]) Glaströge für diese Versuche in verschiedenen Formen liefern **Leybolds Nachf.** in Köln, eine Projektionsküvette mit verschiedenen Nebenapparaten **Max Kohl** in Chemnitz.

Das Verhalten von Phenolphtalein gegen Alkalien und Säuren, das Verhalten von Kalibichromat und übermangansaurem Kali gegen schweflige Säure, das Bleichen von Indigo durch Chlor, das Blauwerden von Kobaltchlorürlösung durch Zusatz von Salzsäure oder Alkohol, die Darstellung von Anilinfarben, das Entfärben von Rosanilinlösung bei Zusatz von Ammoniak, die Wiederherstellung der ursprünglichen Farbe bei Zusatz von Essigsäure u. s. w. sind andere Beispiele.

Zur Demonstration ohne Projektion, bei Mischung in einer langen Glasröhre (wie beim Diffusionsversuch) empfiehlt Kuhfahl (Z. 7, 248, 1894) Alkohol mit Korallin gefärbt. Beim Diffundieren in Wasser geht die orangegelbe Farbe in Rot über. Infolge der Diffusion vergrößert sich die rote Grenzzone allmählich nach beiden Seiten hin.

204. Kontraktion. Aus den Gewichten der gemischten Flüssigkeiten und der Summe der Volumina ergibt sich das spezifische Gewicht der Mischung nur unter der Voraussetzung, daß sich die Volumina durch die Mischung nicht ändern. Mischt man z. B. 200 ccm Bittersalzlösung vom spezifischen Gewicht 1,225 mit v ccm Wasser, so daß die Mischung das spezifische Gewicht 1,07 bekommt, so müßte sein

$$200 . 1{,}225 + v = (200 + v)\ 1{,}07,$$

somit $v = 440$ ccm. Tatsächlich trifft dies indes im allgemeinen nicht genau zu.

Bei der Mischung von Alkohol und Wasser z. B. entsteht eine ziemlich beträchtliche Kontraktion der Mischung, welche man zeigen kann, wenn man wie bei Demonstration der Diffusion eine etwa 1,5 m lange und 1 cm weite, unten geschlossene Glasröhre halb mit Wasser, halb mit gefärbtem Alkohol füllt, dann verschließt und wiederholt umkehrt, bis gleichmäßige Mischung der Flüssigkeiten erfolgt ist. Das Volumen hat sich dann um mehrere Kubikcentimeter verkleinert.

Ähnlich verfährt v. Babo. Zwei weite Glasröhren sind durch einen nicht zu engen Glashahn verbunden und an den Enden ebenfalls durch Glashähne verschlossen. Man füllt die eine völlig mit Wasser, die andere völlig mit Alkohol, stellt den Apparat so auf, daß sich die Wasser enthaltende Röhre oben befindet und öffnet nun den Verbindungshahn. In dem Maße, als Mischung stattfindet, bildet sich ein leerer Raum im oberen Gefäße. Sollen beim Mischen von Alkohol und Wasser klare Gemische entstehen, so muß man frisch ausgekochtes destilliertes Wasser verwenden.

Looser (Z. 15, 267, 1902) benutzt zum Nachweis, daß Lösungen von Salzen in Flüssigkeiten einen geringeren (zum Teil auch größeren) Raum einnehmen als Lösungsmittel und Salz vor dem Vermischen sein Thermoskopmanometer. Für Kochsalz ergab sich eine Volumenverminderung, für Salmiak eine fast ebenso große Volumenvermehrung, für Zucker keine merkliche Änderung.

205. Chemische Niederschläge. Ein prachtvolles mikroskopisches Demonstrationsobjekt ist die in schönen blauen Kristallen auftretende Verbindung von Kobaltchlorür mit Anilin. Man mischt Anilin mit gleichviel oder etwas mehr Alkohol und bringt es in Berührung mit gesättigter Lösung von Kobaltchlorür.

Interessant sind die Fällungen von Chlor-, Brom- und Jodblei aus Bleinitrat mit Chlor-, Brom- oder Jodammonium. Man sieht Formen auftreten, die sich nur kurze Zeit halten können und dann von anderen aufgezehrt werden.

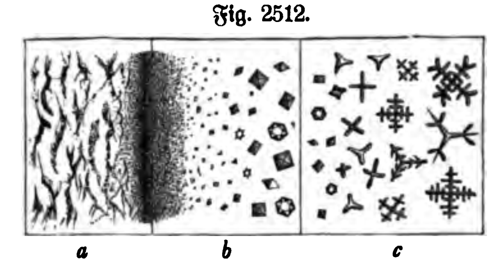
Um amorphe Niederschläge zu demonstrieren, kann man verdünnte Lösung von Bleinitrat mit verdünntem Schwefelwasserstoffwasser fällen.

Um zu zeigen, wie entstandene Niederschläge wieder durch Auflösung verschwinden, kann ein Niederschlag von Quecksilberchlorid mit Jodkalium oder Antimonlösung mit Schwefelammonium dienen.

In allen genannten Fällen wird das Projektionsmikroskop benutzt, erst ein Tropfen der einen Lösung aufgebracht, mit flachem Uhrglas (die konkave Seite nach oben) bedeckt und nun die andere Lösung an den Rand gebracht, worauf sie infolge der Kapillarattraktion sich alsbald in Form eines Ringes um die erste herumzieht, so daß nun durch Diffusion langsam Mischung eintritt.

Im allgemeinen entsteht durch die chemische Reaktion zunächst eine Lösung des neuen flüssigen oder festen Körpers, welche rasch übersättigt wird und darauf Tröpfchen oder Kriställchen ausscheidet. Die Dimensionen der letzteren sind um so kleiner, je geringer die Löslichkeit und je größer die Geschwindigkeit der Fällung. Die Fig. 2512 a bis c zeigen beispielsweise verschiedenartige Niederschläge von Chlorsilber an der Grenze der Reagenzien unter dem Mikroskop.

Fig. 2512.



Sehr hübsch gestalten sich die Versuche über chemische Reaktion mittels des Projektionsapparates, worauf namentlich Landolt (1879) aufmerksam gemacht hat. Liesegang empfiehlt besonders folgende zwei Versuche. Eine aus zwei Glasplatten, zwischen welche ein U-förmiger Kautschukschlauch eingeklemmt ist, bestehende Küvette wird zu drei Vierteln mit Wasser angefüllt, in die Laterna magica an den Ort des Bildes gesetzt, etwas Kupfervitriollösung hinein getröpfelt und das Gemisch durch Umrühren mit einem Glasstabe gleichmäßig gemacht. Bringt man nun mittels einer Pipette einige Tropfen verdünntes Ammoniak hinein, so sieht man auf der Wand alsbald schwarze Sturmwolken entstehen, die wie durch einen Wirbelwind durcheinander gejagt werden; allmählich aber verschwinden diese Wolken und es bleibt eine klare himmelblaue Färbung. Durch Zusatz von etwas verdünnter Schwefelsäure wird die chemische Änderung wieder rückgängig.

Sobald die Wolken aufs neue entschwunden sind, läßt man aus einer kleinen Pipette einige Tropfen Auflösung von gelbem Blutlaugensalz hineinfallen, hierdurch bilden sich schöne rote Wolken von Ferrocyankupfer.

Andere Beispiele sind: Eintropfen von Lösung von gelbem Blutlaugensalz in Eisenvitriollösung (Bildung von Berlinerblau); Eintropfen von Ammoniak in Zinksulfatlösung, Eintropfen von Kochsalzlösung in Lösung von Silbernitrat; Eintropfen von Schwefelsäure in Chlorbaryumlösung u. s. w. Die Lösungen müssen im allgemeinen sehr verdünnt gewählt werden.

Bringt man in ein Reagenzglas einige Kubikcentimeter flüssiges Zinnchlorid und läßt unter zeitweiligem Umschütteln Wasser dazu tropfen, so erstarrt die ganze Masse, sobald die richtige Mischung erreicht ist, zu festem, wasserhaltigem Zinnchlorid.

Ein anderes leicht zu demonstrierendes Beispiel liefern Schwefelchlorür und Wasser. Tropfen des ersteren sinken, ohne sich mit dem Wasser zu mischen, ähnlich wie Schwefelkohlenstofftropfen in demselben unter, bald aber erfolgt Zersetzung unter Bildung von Chlorwasserstoffsäure, schwefliger Säure und Schwefel.

Nach Awerkijews (1903) kann metallisches Gold durch käufliches Formaldehyd (etwa 10 ccm auf 300 ccm Lösung) in kristallinischem Zustande abgeschieden werden, doch muß die angewandte Goldchloridlösung mindestens 0,05 Proz. Gold enthalten, außerdem stark mit Salpetersäure oder Salzsäure angesäuert werden.

206. Chemische Auflösung fester Körper. Die chemische Auflösung ist dadurch charakterisiert, daß nicht, wie bei der physikalischen, ein Sättigungspunkt auftritt von der Art, daß eine geringe Steigerung des Prozentgehaltes der Lösung über diesen hinaus bewirkt, daß der Körper wächst, statt sich aufzulösen. Man wirft ein Stückchen Natrium auf wässerige Salzsäure, es verschwindet und erscheint auch beim Verdunsten des Wassers nicht wieder, sondern an seiner Stelle Kochsalz. Nebenbei entwickelt sich, wie durch Entzündung des freiwerdenden Gases zu sehen, Wasserstoff. Es ist nötig, den Versuch mit Vorsicht auszuführen, da sich dabei das Natrium stark erhitzt, schmilzt und zuweilen unter Explosion umherspritzt. Man wende deshalb ein hohes Glas an und stelle sich nicht zu nahe davor. Das Natrium muß unter Steinöl aufbewahrt werden. Die etwa darauf abgelagerte Rinde, welche vorzugsweise zu den Explosionen Veranlassung gibt, schabt man vor der Benutzung mit einem Messer ab.

Ätzbaryt vereinigt sich sehr heftig mit Schwefelsäure zu schwefelsaurem Baryt, der ganz unlöslich und unveränderlich ist, daher als dauerhafte weiße Farbe Verwendung findet.

Silber löst sich leicht in Salpetersäure und die Lösung hinterläßt beim Verdunsten schöne Kristalle von salpetersaurem Silber, welche die Haut schwarz färben und ätzen (weshalb man vorsichtig damit umgehen muß, insbesondere, da die Wirkungen nicht sofort, sondern erst nach einiger Zeit auftreten).

Man kann hier auch auf die Gesetze der Stöchiometrie, das Titrieren und andere chemische Arbeiten, die Technik des Metall- und Glasätzens u. s. w. hinweisen.

207. Verschiedenheit der chemischen Affinität. Merz und Weith machen auf einige Vorlesungsversuche aufmerksam, die recht geeignet sind, die Verschiedenheit der Affinität bei Körpern zu zeigen, die im übrigen sehr ähnliche physikalische oder chemische Eigenschaften besitzen. Bringt man etwas Natrium in Brom, so tritt selbst nach jahrelangem Stehen keine Reaktion ein, selbst beim Erhitzen bis 200° macht sich nur eine schwache Einwirkung geltend. Nimmt man dagegen Kalium, so tritt die Reaktion sofort äußerst stürmisch, selbst explosionsartig ein. Bringt man Natrium in Anilin, so bleibt es vollkommen blank, selbst wenn das Anilin bis zum Sieden erhitzt wird, Kalium dagegen entwickelt bereits in der Kälte Wasserstoff und beim Erhitzen wird die Reaktion sehr heftig.

Gewöhnlicher Phosphor auf Brom geworfen, vereinigt sich mit demselben unter Detonation, roter dagegen entzündet sich einfach und brennt ruhig ab.

Alle diese Versuche verlangen indes große Vorsicht und können, von einem Unerfahrenen angestellt, großes Unheil anrichten.

208. Reaktionsgeschwindigkeit. Mischt man verdünnte Lösungen von schwefliger Säure und Jodsäure und setzt etwas Stärke zu, so wird, wie Landolt gefunden

hat, nach Verlauf einer genau bestimmbaren Zeit infolge der Ausscheidung von Jod die Mischung plötzlich blau.

Der Versuch macht besonders dann großen Effekt, wenn man sich die Zeit bis zum Eintritt für die betreffenden Konzentrationen ausprobiert hat und dann bei Ausführung des Versuchs nach dem Takte eines Sekundenschlägers die Sekunden zählt. Sobald die vorher gesagte Sekunde genannt wird, färbt sich die farblose Mischung plötzlich dunkel blau und fast schwarz, wenn das Gefäß, etwa ein Becherglas, hinreichend groß ist.

Ähnlich verhält sich (nach Liebreich) eine Mischung verdünnter Lösungen von Chloralhydrat und kohlensaurem Natron, welche einige Zeit nach der Herstellung sich plötzlich infolge der Bildung eines Chloroformniederschlages milchig trübt. In der Nähe der freien Oberfläche entsteht kein Niederschlag, sondern es bildet sich aus nicht aufgeklärten Gründen (vielleicht Verdunstung [1]) ein „toter Raum".

Ein sehr bekanntes Beispiel ist die Reduktion von Fehlingscher Lösung durch verdünnte Zuckerlösungen.

Küspert (Z. 16, 285, 1903) empfiehlt die Reduktion von Silberlösung durch Formalin. Zu den messenden Versuchen wurden benutzt: 1. Zehntelnormales Silbernitrat (17 g $AgNO_3$ im Liter), 2. verdünntes, gewöhnliches Wasserglas (1:10 Vol.), 3. verdünntes Formalin (Formalin solut. 1:60 Vol.). Bei gewöhnlicher Temperatur erfolgt die Reaktion dieser Lösungen nur langsam, bei etwa 50° dagegen annähernd in einer Stunde, so daß sich das Fortschreiten der Reduktion ganz bequem verfolgen und die zwischenliegende Zeit zu den nötigen Erklärungen verwenden läßt.

Zu 25 ccm von Lösung 2 und 1 ccm von 1 fügt man:

	Wasser ccm	Formalin ccm	Die Färbung bei 46° ist dann nach 5 Minuten	25 Minuten	50 Minuten
I	22	2	—	weingelb	rotbraun
II	20	4	—	hellrotbraun	dunkelrotbraun
III	18	6	weingelb	braun	dunkelrotbraun
IV	16	8	gelb	sattbraun	dunkelrotbraun
V	14	10	gelbbraun	dunkelbraun	dunkelrotbraun

209. Katalyse und Katatypie. Die Reaktionsgeschwindigkeit kann auch beschleunigt werden durch sogenannte Katalysatoren. Als solche wirken z. B. fein zerteilte Metalle, Braunstein (Mangansuperoxyd) u. s. w. Man kann die Wirkung z. B. zeigen bei Wasserstoffsuperoxyd. Nach Staebel (Z. 15, 369, 1902) katalysiert eine winzige Menge Platinmohr oder Braunsteinpulver das reine Superoxyd mit explosionsartiger Heftigkeit. Mischungen von Kohle oder Magnesiumpulver mit Spuren von Braunstein werden sofort entzündet, Bleistaub entzündet sich sofort, ebenso Wolle.

Auch flüssige und gelöste Stoffe können als Katalysatoren wirken. Ostwald zeigt dies durch folgenden Versuch: Wird zu wasserheller Jodkaliumlösung (ebenso wasserhelle) Essigsäure hinzugefügt, so findet im Laufe sehr langer Zeit Aus-

[1]) Da wo Verdunstung ausgeschlossen ist, scheinen die durch die sinkenden Tröpfchen verursachten Wirbel die Ursache zu sein.

scheidung von Jod statt. Die Ausscheidung tritt aber fast plötzlich ein, falls man ein Eisensalz zusetzt, das seinerseits unverändert bleibt. Tränkt man Fließpapier mit jener wasserhellen Mischflüssigkeit und zeichnet darauf mit einer farblosen Eisensalzlösung, so treten die Zeichen in blauer Farbe hervor.

Längst bekannte Beispiele sind die Umwandlung von Stärke in Dextrin und in Zucker durch verdünnte Säuren und die im Malzextrakt enthaltene Diastase; die Beschleunigung der Reaktion zwischen Wasserstoffsuperoxyd und übermangansaurem Kali beim Titrieren durch eingebrachten Platinmohr; die Wirkung salpetriger Säure auf die Auflösung von Kupfer in ausgekochter konzentrierter Salpetersäure; die Auflösung von metallischem Chrom in Salzsäure, welche periodisch schwächer wird und wieder ansteigt, falls eine minimale Menge (0,001 Proz.) Dextrin beigefügt wird.

Eine kleine Menge von Quecksilber kann nach Biernacki (Wied. Ann. 59, 664, 1896) die Oxydation einer großen Menge Aluminium veranlassen, wenn es sich mit dem Aluminium amalgamiert. In gewöhnlicher feuchter Luft oxydiert die amalgamierte Stelle sehr rasch, d. h. es bildet sich Tonerde, das Quecksilber scheidet sich aus und verbindet sich sofort mit einer neuen Menge Aluminium, die abermals oxydiert u. s. w.

Am bequemsten benutzt man Aluminiumdraht von 2 mm Dicke, welchen man mit dem einen Pol einer galvanischen Batterie von einigen Volt Spannung verbindet und einigemal in Quecksilber eintaucht, welches mit dem anderen Pol in Verbindung steht. Er amalgamiert sich dann an den Stellen, wo Fünkchen auftreten und dort wachsen alsbald große weiße Büschel reiner Tonerde heraus.

Wird Papier mit verdünnter Lösung von übermangansaurem Kali bestrichen, wobei es sich infolge der Bildung von Mangansuperoxydhydrat bräunt, und nun mit einer Oxalsäurelösung eine Figur darauf gezeichnet, d. h. an den betreffenden Stellen des Mangansuperoxyd reduziert, alsdann das Ganze mit Wasserstoffsuperoxydlösung übergossen, welche an den braun gebliebenen Stellen katalysiert wird, und nun das so präparierte Papier an Gelatinepapier gedrückt, welches mit ammoniakhaltigem Manganoxydulsalz imprägniert ist, so entsteht durch Bildung von Mangansuperoxydhydrat an den Stellen, wo unzersetztes Wasserstoffsuperoxyd vorhanden ist, eine braune Kopie der Figur, die durch Behandlung mit Anilin infolge der Bildung von Anilinschwarz in eine schwarze verwandelt werden kann.

An Stelle der Zeichnung auf gebräuntem Papier kann man auch irgend ein photographisches Negativ benutzen, da das feinzerteilte Silber desselben ebenfalls als Katalysator wirkt. Die Kopie wird dann ein schwarzes Positiv. (Katatypie von Ostwald und Gros 1903.) Lösungen von Pyrogallol und Kaliumbromat zusammengebracht wirken nur sehr langsam aufeinander, ein mit der Mischung getränktes Papier bleibt farblos. Wird dieses aber gegen eine Photographie auf Platinpapier gepreßt, so entsteht eine braunrote Kopie, da das Platin als Katalysator wirkt.

Da der Gelatine durch Berührung mit Wasserstoffsuperoxyd die Quellfähigkeit und Löslichkeit genommen wird, können auch durch dasselbe Verfahren Druckplatten gewonnen werden, mittels deren nach dem gewöhnlichen mechanischen Druckverfahren weitere Kopien hergestellt werden können. (Roth, Z. 16, 156, 1903.)

210. Aufzehren. Bringt man unter dem Mikroskop Kristalle von Silbernitrat zusammen mit Schwefelsäure, so bilden sich Kristalle von Silbersulfat, welche die

des Silbernitrats aufzehren. (Projektion mittels des Mikroskops.) Auf ähnlichen Umsetzungen beruht das Erhärten von Zement und Gips, z. B. das **Kitten** mit Gips und die Herstellung von **Gipsfiguren**. Wird wasserfreier Gips mit Wasser angerührt, so bilden sich Kriställchen von wasserhaltigem Gips, welche diejenigen des wasserfreien rasch aufzehren. Wird Blei mit Quecksilber zusammengebracht, so wird es unter Bildung von Amalgam aufgezehrt, es entsteht eine **Pseudomorphose**. (**Spiegelbelegung, Zahnplomben.**) Pseudochlorkarbostyril kann scheinbar in festem Zustande in Parachlorkarbostyril übergehen. In Wirklichkeit geschieht dies nur unter Vermittelung von Feuchtigkeit, durch „aufzehren" [1]).

211. Molekularverbindungen. Läßt man Salmiak mit Eisenchlorid unter dem Projektionsmikroskop kristallisieren und setzt immer mehr Eisenchlorid zu, so entstehen zuerst Mischkristalle, dann das Doppelsalz.

Bezüglich der Lösung eines solchen Doppelsalzes gilt dasselbe wie für die Lösung von Mischkristallen. Sie hat genau dieselben Eigenschaften wie ein Gemisch der Lösungen der Komponenten, während die Lösung einer chemischen Verbindung verschieden ist von dem Gemisch der Lösungen ihrer Bestandteile, falls diese nicht beim Zusammenmischen sich zu der Verbindung vereinigen oder erstere sich beim Auflösen zersetzt, denn man erhält auch dieselbe Lösung, ob man Kochsalz oder eine Mischung von Ätznatron und Salzsäure in Wasser auflöst. Man hat deshalb vermutet, auch die Doppelsalze seien eine Art von Mischkristallen, doch ist der Schluß keineswegs bindend. Entschieden gegen die Hypothese spricht, daß die Eigenschaften von Mischkristallen die Mitte halten zwischen denen der Bestandteile, was für die Kristallwasserverbindungen, sowie für die Doppelsalze nicht zutrifft. Ferner besteht ein wesentlicher Unterschied darin, daß in Mischkristallen die Bestandteile entweder überhaupt oder bis zu einer gewissen Grenze in allen möglichen Verhältnissen vorhanden sein können, während für die Kristallwasseraufnahme die **stöchiometrischen Proportionen** maßgebend sind. Somit ist wohl anzunehmen, daß auch Doppelsalze und die sich ganz ähnlich verhaltenden Verbindungen mit **Kristallwasser, Kristallalkohol, Kristallbenzol** u. s. w. zu den chemischen Verbindungen zu rechnen sind. Da sie sich indes nach der üblichen chemischen Strukturtheorie nicht als Atomverbindungen auffassen lassen, nennt man sie Molekularverbindungen.

Die Aufzehrungserscheinungen, welche sowohl bei Mischkristallen (S. 871) wie auch bei chemischen Verbindungen zu beobachten sind, treten natürlich auch bei diesen Molekularverbindungen auf. Z. B. kann bei Zumischung von Wasser eine wasserfreie Substanz unter Pseudomorphosenbildung in die wasserhaltige übergehen.

Ferner können aus derselben Lösung Kristalle mit verschiedenem Wassergehalt auskristallisieren, welche verschiedene Löslichkeit haben, so daß die **stabilen** von den **labilen** aufgezehrt werden.

Auch in dieser Hinsicht unterscheiden sich die Molekularverbindungen wesentlich von den Mischkristallen, da sich diese höchstens in zwei verschiedenen Mischungsverhältnissen (viel von Stoff 1 und wenig von 2, sowie umgekehrt) aus derselben Lösung ausscheiden können.

Indifferente Stoffe stören sich bei der Lösung nicht. Löst man z. B. in Wasser zunächst Chlorammonium und sodann Ammoniumnitrat, so löst sich letzteres in

[1]) Siehe O. Lehmann, Molekularphysik 1, 601, 1888; Flüssige Kristalle, S. 158.

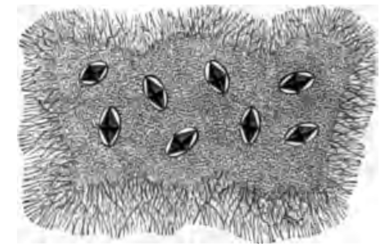
gleicher Menge, als ob das Chlorammonium nicht vorhanden wäre. Ebenso umgekehrt. Stellt man eine gesättigte Lösung von Chlorammonium und Ammoniumnitrat her und gibt etwas von der einen oder anderen Substanz in pulverisiertem Zustande zu, so löst sich, konstante Temperatur vorausgesetzt, dieser Überschuß nicht mehr auf, selbst wenn man wiederholt schüttelt.

Anders verhalten sich, wie Rüdorff gefunden hat, Salze, welche miteinander Mischkristalle oder Doppelsalze bilden können. Man fülle zwei mit Glasstöpseln zu verschließende Cylinder von angemessener Höhe (oder auch zwei Reagenzgläser von gleichen Dimensionen) bis zu zwei Dritteilen mit der gesättigten Lösung des Doppelsalzes Ammonium-Kupfersulfat, füge zu der einen Lösung einige Messerspitzen voll sehr fein gepulvertes Ammoniumsulfat und schüttele einige Minuten tüchtig. Nach einigen Augenblicken der Ruhe ist die Flüssigkeit fast entfärbt, jedenfalls blasser als die zur Probe danebenstehende ursprüngliche Lösung des Doppelsalzes. Es ist also Kupfersulfat durch Ammoniumsulfat verdrängt worden.

Im allgemeinen sind diese Vorgänge sehr komplizierter Natur, da sich nicht einmal einfache Salze unverändert in Wasser lösen, sondern, wie aus später zu besprechenden Erscheinungen hervorgeht, zum großen Teil in ihre Bestandteile zerfallen (Dissoziation), welche erst dann sich wieder vereinigen, wenn durch den Kristallisationsprozeß unzerfallene Moleküle der Lösung entzogen werden, so daß das Mengenverhältnis der verschiedenen Moleküle und Atome in der Lösung gestört würde.

212. Polymorphie. In manchen Lösungen können gleichzeitig Kristalle von zwei verschieden beschaffenen Modifikationen der gelösten Substanz wachsen. Auch hier zeigt sich die Erscheinung, daß wenn ein Kristall der einen (stabilen) Art in die Nähe eines Kristalls der anderen (labilen) kommt, sich letzterer auflöst, von dem ersten „aufgezehrt" wird. Fig. 2513 zeigt z. B. die Aufzehrung der in feinen Nadeln auftretenden Modifikation des salzsauren Chrysoidins durch die in tetragonalen Oktaedern kristallisierende Modifikation. Zur Demonstration (mittels des Projektionsmikroskops) kann etwa eine heiße Lösung von Phtalsäureanhydrid dienen, welche beim Erkalten blättchenförmige labile und nadelförmige stabile Kristalle abscheidet.

Fig. 2513.



Die große Analogie zwischen den Aufzehrungserscheinungen bei wasserhaltigen Salzen und solchen polymorpher Modifikationen weist darauf hin, daß auch letztere wie die ersteren als Molekularverbindungen aufzufassen sind, daß mindestens ihre Moleküle als verschieden beschaffen betrachtet werden müssen. Man kommt so zu der Vorstellung, daß es außer einer chemischen Isomerie auch eine physikalische Isomerie gibt, daß man neben chemischen Molekülen physikalische unterscheiden muß, die vielleicht als Aggregate von chemischen angesehen werden können. Gewöhnlich pflegt man allerdings die Polymorphie zu erklären durch Anordnung derselben Moleküle zu verschiedenen Raumgittern, indes wird diese Ansicht widerlegt durch die Tatsache, daß sich durch Deformation die physikalischen Eigenschaften nicht ändern[1]). Wenig zutreffend ist auch der Ausdruck Polymorphie, insofern z. B.

[1]) Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann, S. 184.

Salmiak in zwei Modifikationen kristallisiert, die beide die Gestalt regulärer Würfel haben.

213. **Gleichgewicht bei Mischkristallen.** Kalisalpeter kristallisiert in rhombischen Prismen, Natronsalpeter in Rhomboedern. Aus einer Lösung, welche beide Salze enthält, kristallisieren Mischkristalle in beiden Formen und zwar, wenn die Lösung vorherrschend Natronsalpeter enthält, nur Rhomboeder, die um so mehr Kalisalz enthalten, je mehr man solches der Lösung zusetzt, bis zu einer gewissen Grenze. Wird diese überschritten, so bilden sich neben den Rhomboedern Prismen, welche nur wenig Natronsalpeter enthalten und schließlich allein entstehen, wenn der Kaligehalt allzusehr gesteigert wird. (Projektion mittels des Mikroskops.)

214. **Amorphe Niederschläge.** Bringt man auf den Objektträger des Mikroskops ein Tröpfchen alkoholischer Harzlösung, die man zweckmäßig durch einen Anilinfarbstoff färbt, oder auch alkoholische Lösung eines Anilinfarbstoffes, der in Wasser unlöslich ist (z. B. Anilinblau), allein, bedeckt ihn mit einem flachen Uhrglas, die konkave Seite nach oben, und läßt nun an den Rand ein Tröpfchen Wasser zufließen, so tritt wie beim Mischen von Flüssigkeiten Schichtbildung ein, die Lösung scheidet sich in eine aus Harz und wenig Alkohol bestehende Mischung und einen Teil, der aus Alkohol und Wasser besteht. Der erstere sondert sich dabei nicht als kontinuierliche Schicht aus, sondern in Form feiner Tröpfchen, die aber bei genügender Vergrößerung und passender Wahl des Harzes (dem man eventuell etwas Terpentinöl, Benzol und dergl. zusetzt) deutlich als solche erkannt werden können. Je mehr Wasser zutritt, um so mehr wird den Tröpfchen Alkohol entzogen und schließlich bilden sie etwas zusammengeschrumpfte Kugeln von fast reinem Harz.

Ähnlich erfolgt die Fällung von arabischem Gummi aus wässeriger Lösung, der man zweckmäßig einen in Alkohol unlöslichen Farbstoff zusetzt, wenn sie mit Alkohol in Berührung gebracht wird. Natürlich darf die Lösung nur sehr verdünnt sein, da sich anderenfalls an der Grenze eine dichte, aus dem Niederschlag zusammengesetzte Haut bildet, welche den weiteren Zutritt des Alkohols völlig hemmt.

215. **Amorphie.** Kristallisierter und amorpher Zucker geben beim Auflösen dieselbe Lösung, wie z. B. zwei verschiedene Modifikationen des salpetersauren Ammoniaks oder wasserfreie und wasserhaltige Soda. Man hat hieraus schließen wollen, daß sich amorphe Körper von kristallisierten nicht durch die Beschaffenheit der Moleküle unterscheiden, sondern nur durch deren unregelmäßige Lagerung. Dem widerspricht aber, daß sich bei amorphen Körpern keine Homöotropie zeigt und daß auch bei weitest gehender Deformation von Kristallen keine Annäherung an die Eigenschaften der amorphen Körper erzielt wird, zu welchen vor allem gehört der Mangel reversibler Löslichkeit oder das Fehlen eines Sättigungspunktes für die Lösung[1]). Amorpher Zucker löst sich stets auf, wieviel Zucker auch in dem Wasser bereits gelöst sein mag und erzeugt eine Lösung, die übersättigt ist in bezug auf kristallisierten Zucker. Eine sehr geringe Menge von Feuchtigkeit genügt deshalb, um amorphen Zucker durch kristallisierten aufzehren zu lassen, ihn zu entglasen. Gleiches gilt für die Umwandlung glasiger arseniger Säure in porzellanartige. Insofern

[1]) Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, 1904, S. 210.

diese Umwandlungen durchaus entsprechen der oben erwähnten Umwandlung von Pseudochlorkarbostyril in die chemisch isomere Verbindung, beweisen sie nichts für die gleiche Beschaffenheit der Moleküle.

216. Kolloidale Lösungen. Niederschläge von außerordentlicher Feinheit (Durchmesser der Körnchen wenige Hunderttausendstel Millimeter) setzen sich nicht ab, sondern bleiben suspendiert und erscheinen äußerlich ganz ähnlich wie Lösungen. Sie unterscheiden sich aber von solchen sehr wesentlich durch den Mangel eines Sättigungspunktes. Beispielsweise kann kolloidales Silber nach Carey Lea in folgender Weise erhalten werden[1]):

Man mischt 500 ccm einer 30 proz. Lösung von Eisenvitriol[2]) mit 700 ccm einer Lösung von 280 g kristallisiertem Natriumcitrat (mit 2 Mol. Wasser) in Wasser, gibt dazu 125 ccm einer 10 proz. Lösung von Natriumkarbonat und gießt die erhaltene Flüssigkeit unter kräftigem Umrühren in 500 ccm einer 10 proz. Lösung von Silbernitrat. Nach dem Absetzen des entstehenden schön blauen Niederschlags, welches längere Zeit in Anspruch nimmt, dekantiert man die überstehende Flüssigkeit, bringt den Niederschlag auf ein Saugfilter und saugt die Mutterlauge möglichst vollständig ab, wäscht eventuell noch mit einer Lösung von Ammoniumcitrat aus.

In destilliertem Wasser löst sich das in solcher Weise frisch dargestellte kolloidale Silber mit roter Farbe. Stark verdünnte Lösungen erscheinen vollkommen klar, konzentriertere mehr oder weniger trübe. Versetzt man käufliches (3 proz.) Wasserstoffsuperoxyd mit einem Tropfen Alkali und gibt dann kolloidale Silberlösung hinzu, so wird das Wasserstoffsuperoxyd unter Sauerstoffentwickelung zerlegt (Katalyse). Nach Bredig u. Weinmayr (Boltzmann-Festschrift 1904, S. 839) kann auf den Goldpartikelchen kolloidaler Goldlösungen Quecksilber niedergeschlagen werden.

Nach Ramsay (Beibl. 26, 232, 1902) ist das mittels des Pyknometers bestimmte spezifische Gewicht kolloidaler Lösungen nicht merklich verschieden von dem mit der hydrostatischen Wage bestimmten, die schwebenden Teilchen vermehren also den Bodendruck der Flüssigkeit ebenso, als wenn sie darin gelöst wären.

Hierher gehören auch Lösungen von arabischem Gummi oder Leim, Lösungen mancher Farbstoffe (Berlinerblau, Naphtolgelb u. s. w.), die violette Flüssigkeit, welche entsteht bei Übergang eines Lichtbogens von Goldelektroden unter Wasser, das rote Rubinglas (Glas mit feinen Goldpartikelchen) u. s. w.

Alle diese Lösungen sind nur Pseudolösungen, Suspensionen oder Emulsionen. Der Ausdruck Emulsion wird speziell gebraucht, wenn die kleinen suspendierten Körperchen als Tröpfchen zu betrachten sind.

Küspert (Z. 16, 285, 1903) empfiehlt als Demonstrationspräparat für kolloidale Lösungen die bereits oben S. 876 erwähnten Silberlösungen. (Zur Dialyse eignen sich die Pergamentschläuche, wie sie zur Fabrikation von Erbswurst dienen.)

Befördert wird die Haltbarkeit kolloidaler Lösungen durch Zusatz von Gelatine oder anderer Kolloide von größerer Haltbarkeit. Küspert benutzt im genannten Falle Wasserglaslösung zur Erhöhung der Haltbarkeit. Vermutlich bildet sich durch

[1]) Siehe Heumann-Kühling, Anleitung zum Experimentieren, 3. Aufl., Braunschweig 1904, S. 700. — [2]) 150 g frisch umkristallisiertes, lufttrockenes Eisenoxydulsulfat in 500 ccm Wasser.

Absorption ein Überzug auf den Partikelchen, so daß sie sich nun ebenso verhalten, wie Partikelchen des haltbaren Kolloids (Gelatine) selbst.

217. **Sedimentation oder Klärung** (Ausflockung, Gerinnung, Koagulation, Agglutination). Während eigentliche Lösungen bei Zusatz geeigneter Flüssigkeiten die gelöste Substanz in Form von Kristallen ausscheiden, und zwar in um so größerer Menge, je mehr von dem Fällungsmittel zugesetzt wird, scheiden sich bei kolloidalen Lösungen bei geeigneten Zusätzen (Salzlösungen, Säuren) die suspendierten Partikelchen sofort sämtlich in Form von Flocken aus. Beispielsweise wird die oben erwähnte kolloidale Silberlösung nach Carey Lea bei Zusatz von Salpeterlösung momentan entfärbt, indem sich das kolloidale Silber niederschlägt. Der Niederschlag ist wie die anfängliche Substanz in reinem Wasser löslich. Ebenso wird die Lösung durch Tierkohle oder Baryumsulfat entfärbt.

Durch Zusatz von Gelatine kann die Fällung mit Salpeter verhindert werden. Schlägt man aber die Gelatine mit Alkohol nieder, so reißt dieselbe auch das kolloidale Silber mit sich. Auch dieser Niederschlag löst sich in reinem Wasser wie die ursprüngliche Substanz.

Die meisten organischen Farbstoffe lassen sich aus wässeriger Lösung aussalzen, d. h. sie scheiden sich bei Zusatz von Kochsalzlösung als feine Niederschläge aus. Zur Demonstration kann z. B. salzsaures Chrysoidin dienen. Bringt man zu der wässerigen Lösung desselben etwas Chlornatriumlösung oder Salzsäure, so schlägt sich die Substanz alsbald in Form dünner Häute nieder. Dieses Gerinnsel ist zwar ebenfalls salzsaures Chrysoidin, aber nicht die gewöhnliche kristallisierte Modifikation und wird von dieser allmählich aufgezehrt (Fig. 2513).

Verdünnte „flüssige Tusche“ kann sowohl durch Salze wie durch manche Anilinfarben niedergeschlagen werden[1]). Der Farbstoff verschwindet dann ebenfalls aus der Lösung, er wird „mitgerissen“ oder absorbiert.

Setzt man zu trübem Wein oder irgend einer anderen trüben Flüssigkeit Hausenblase, so wird die Trübung bald aufgehoben. Ähnliche Wirkung hat Zusatz von Alaun und verschiedenen anderen Salzen.

Wird ein pulverisiertes Mineral in eine Lösung von gleichem spezifischen Gewicht (Thoulets Lösung, vgl. S. 858) gebracht, so sinken allmählich infolge Absorption des Salzes die feinsten Partikel zu Boden, während die größeren schweben bleiben.

Läßt man die milchige Flüssigkeit, welche durch Zusammengießen sehr verdünnter Lösungen von Silbernitrat und Kochsalz entsteht, längere Zeit stehen, so beobachtet man, wie allmählich die Trübung mehr und mehr abnimmt und die feinen Chlorsilberpartikelchen sich zu Flocken sammeln.

Breiartige Aquarell- oder Ölfarben, wie solche in Tuben käuflich sind, verhalten sich sehr verschieden, insofern einige sich leicht von der Flüssigkeit trennen und in Klumpen zusammenballen, während andere stets gleichmäßig damit gemengt bleiben.

Viele Bakterien bilden in Wasser aufgeschwemmt eine trübe Flüssigkeit, aus der sie selbst bei wochenlangem Stehen nicht sedimentieren. Setzt man aber das Serum eines Tieres zu, dem man vorher gleichartige Bakterien injiziert hatte

[1]) Vergl. O. Lehmann, Zeitschr. f. phys. Chemie 14, 157, 1894.

(Immunserum), so flockt die Bakteriensuspension aus (Agglutination nach Greber-Durham). Nach Bechhold[1]) wird die Ausflockung wie bei kolloidalen Lösungen durch Gelatine gehemmt und zwar infolge davon, daß dieselbe die Bakterien umhüllt, so daß sich die Suspension wie eine kolloidale Lösung von Gelatine verhält[2]).

218. Die Lackfarben und Farbbeizen. Versetzt man eine Lösung eines Farbholzextraktes mit Alaun und setzt kohlensaures Natron zu, so daß sich Tonerde niederschlägt, so „reißt", wie man zu sagen pflegt, der Niederschlag den Farbstoff mit sich, er erscheint nicht weiß, sondern gefärbt, und entsprechend wird die Färbung der Lösung geschwächt oder gänzlich beseitigt. Die so erhaltenen Farben, die man auf unzählige andere Methoden erhalten kann, bezeichnet man als Lacke. Manche derselben sind sicherlich chemische Verbindungen und etwa als Tonerdesalze zu bezeichnen, bei anderen läßt sich nicht entscheiden, ob sie Verbindungen nach festen Verhältnissen sind, und man erklärt die Wirkung durch „Flächenanziehung". Auf gleichem Prinzip beruht die „echte" Färbung von Geweben, indem man das Gewebe zuvor mit Alaunlösung oder irgend einer anderen „Beize" tränkt.

219. Niederschlagsmembranen und künstliche Zellen. Sehr feinkörnige Niederschläge, die sich an der Grenze zweier Reagenzien bilden, können poröse Häute bilden, die dem Flüssigkeitsdrucke nachgeben, ohne zu zerreißen, da die erweiterten Poren sich immerfort wieder mit neuem Niederschlag ausfüllen. Befindet sich ein Tropfen des einen Reagens in einer größeren Masse des anderen, so erhält man eine (nach Traube) sogenannte künstliche Zelle.

Dendriten, welche zuweilen ganz an organische Formen erinnern, lassen sich erhalten, indem man Kristalle von Kupfervitriol, Eisenvitriol und doppeltchromsaurem Kali in verdünnte Wasserglaslösung einlegt. Ein Stück Salmiak in Lösung von Bleinitrat eingelegt, gibt weiße Dendriten.

Nach Brandstätter (Z. 7, 132, 1894) benutzt man für die Silikatvegetationen am besten Standcylinder, welche man mit verdünnter klarer Wasserglaslösung füllt, die um so konzentrierter sein muß, je leichter die einzubringenden Salzkristalle löslich sind. Besonders gute Vegetationen werden erhalten beim Einwerfen von Baryumchlorid, Aluminium- und Zinksulfat, Eisenvitriol, Ferrichlorid, Kobalt- und Nickelsulfat, Uranylnitrat und Kupfervitriol. Man kann nach beendetem Wachstum mittels eines Hebers die Wasserglaslösung entfernen, indem man gleichzeitig von oben her reines Wasser zufließen läßt. Die Vegetationen halten sich dann Monate lang[3]).

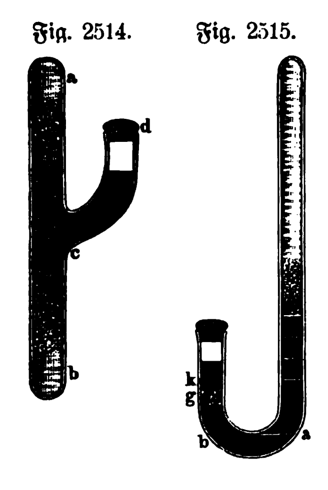
220. Gelatinieren. Um klare durchsichtige Kieselsäuregallerte herzustellen, mischt man verdünnte Salzsäure mit verdünnter Wasserglaslösung und zwar verdünnt man nur wenig und macht erst an einer kleinen Quantität eine Probe; entsteht beim Zusammenbringen noch ein Niederschlag, so sind die Lösungen noch zu konzentriert, man muß also noch etwas verdünnen, macht dann eine zweite Probe u. s. f. Hat man so die richtige Konzentration erreicht, so gießt man beide Lösungen voll-

[1]) Bechhold, Zeitschr. f. phys. Chem. 48, 423, 1904. — [2]) Siehe auch Biltz, ebd. S. 615. — [3]) S. a. G. Quincke Ann. d. Physik 7, 57, 631, 701; 9, 1, 793; 10, 478; 11, 54, 449.

ständig zusammen und überläßt die Lösung sich selbst. Nach einigen Stunden oder Tagen hat sich dieselbe in konsistente Gallerte verwandelt. **Heumann** gibt folgende Anweisung: 45 ccm der käuflichen Lösung des gewöhnlichen Natronwasserglases werden mehrere Stunden vor der Vorlesung, besser am Tage zuvor, in einem großen Becherglase mit 700 ccm destilliertem Wasser verdünnt und dann 120 ccm einer kalt gesättigten Salmiaklösung unter Umrühren zugefügt. Nach einigen Stunden ist der ganze Inhalt des Becherglases erstarrt. Das Festwerden wird durch vergrößerten Wasserzusatz erheblich verlangsamt.

221. Diffusion in Gallerten. **Grahams** Satz, daß ein Salz in freiem Wasser, in porösen Körpern und Gallerten gleich schnell diffundiert, zeigt **H. de Vries** (1885), indem er in eine Glasröhre von 0,5 m Länge und 5 mm Weite eine Lösung von 5 Proz. Gelatine in heißem Wasser bis auf etwa 5 cm vom oberen Ende eingießt und nun irgend eine Farbstofflösung, z. B. Kalibichromat, auffüllt, mit einem Stöpsel verschließt und nun das Ganze umkehrt. Ebenso wird in einer zweiten Röhre Kieselsäuregallerte gebildet, eine dritte einfach mit Wasser gefüllt, der Farbstoff aufgeschichtet, umgekehrt und nun in allen drei Röhren die Diffusion beobachtet. Es zeigt sich, daß dieselbe gleich rasch, oder richtiger, gleich langsam verläuft. Nimmt man bei einer zweiten Serie von Röhren statt Kalibichromat Chromsäure, so läßt sich die verschiedene Geschwindigkeit der Diffusion erkennen[1]). Läßt man in die Enden einer horizontalen Gelatinesäule Chlorbaryum resp. Lösung von schwefelsaurem Magnesium eindringen, so markiert sich die Stelle, wo diese zusammentreffen durch Bildung eines Niederschlages und man kann hiernach das Verhältnis der Diffusionsgeschwindigkeiten bestimmen. Stellt man eine dritte Serie von Röhren in umgekehrter Stellung auf, so daß die Diffusion von oben nach unten erfolgt, so zeigt sich (wenigstens bei Anwendung der Gallerten) abermals die gleiche Geschwindigkeit, während bei Wasser die Strömungen infolge der Dichtedifferenzen sich geltend machen. Einfacher zeigt man übrigens letzteres nach **Detleffen** (1885) mittels des Glasgefäßes Fig. 2514. Man legt dasselbe zunächst so, daß der Teil *ab* horizontale Richtung hat, füllt dann mittels eines Trichters, über dessen Spitze ein Stückchen Gummischlauch gezogen ist, mit einem Gemisch von Salzsäure und verdünnter Wasserglaslösung bis *c*. Nachdem die Masse fest geworden, richtet man die Röhre auf und gießt in *cd* eine Indigolösung. Wie die Figur andeutet, dringt der Farbstoff in die Gallerte ein und verbreitet sich fast mit gleicher Geschwindigkeit nach oben und nach unten.

Fig. 2514. Fig. 2515.



Soll nur einfach die Geschwindigkeit der Diffusion gemessen werden, so kann dazu eine Röhre wie Fig. 2515 dienen. Dieselbe hat 1 cm Weite, der längere Schenkel ist 50 bis 120 cm lang, der kürzere 10 cm.

Trennt man eine Lösung von Eisenchlorid und eine solche von Schwefelcyankalium durch eine tierische Blase, so färben sich beide bald blutrot.

[1]) In sehr verdünnten Lösungen sollte wegen der elektrolytischen Dissoziation die Geschwindigkeit dieselbe sein.

222. Absorption gelöster Stoffe. Elfenbein, auch gewöhnliches Bein, selbst Holz, Eiweiß, Gelatine u. s. w., d. h. Stoffe von gallertartiger Struktur, entziehen Lösungen von Anilinfarbstoffen sehr begierig die Farbe und nehmen selbst eine immer intensivere Farbe an, während die Lösung blasser wird.

Bringt man Seide in schwach essigsaure Cyaninlösung, so zerfällt durch „Flächenanziehung", wie sich die Chemiker ausdrücken, die farblose Lösung und die Seide wird blau.

Man kann hier ferner hinweisen auf das Färben, Gerben, Imprägnieren von Holz, die Kapillaranalyse, Kautschukstempel, den Hektographen u. s. w.

223. Quellung. Wasserfreier Gips in feuchten Sand gebracht, schwillt allmählich auf, indem er sich in wasserhaltigen verwandelt[1]). Stellt man eine Tafel gewöhnlichen Leim in Wasser, so quillt sie im Verlaufe von mehreren Stunden ebenfalls stark auf, indem sie Wasser anzieht, mit welchem der Leim ein Hydrat bildet. Eine Substanz, die noch weit mehr quellungsfähig ist als Leim, ist Tragant. Kleine Körnchen desselben schwellen, in Wasser gelegt, zu ganz unförmlichen Klumpen an. Sehr beträchtliches Quellungsvermögen zeigt auch Kautschuk in Öl, Benzin, Äther u. s. w. Selbst tierische Häute, wie z. B. Schweinsblasen, vermögen zu quellen. (Imbibition, Turgeszenz), auch Eiweißkristalle (Kristalloide).

Gespannte gallertartige Körper kontrahieren sich bei der Quellung mit großer Kraft (Verkürzung gespannter Schnüre, Haare).

Durch Alkohol kann man bis zu gewissem Grade das Quellungswasser wieder entziehen, die Körper schrumpfen entsprechend zusammen. Manche zoologische Präparate werden deshalb mit Alkohol „gehärtet".

224. Osmose. Die einfache Vorrichtung, welche dem hierher gehörigen Versuche entspricht, ist in Fig. 2516 abgebildet. Das innere Gefäß *b* sollte an seiner weiten Öffnung einen etwas umgestülpten Rand haben, oder doch mindestens eine Strecke lang gleich weit sein, um eine Blase[2]) fest auf dasselbe binden zu können. Auch eine etwa 3 cm weite Glasröhre, deren Ränder man an der Lampe etwas ausweitet, kann dazu verwendet werden. Ein Gefäß aus Weißblech, das man mit Ölfarbe anstreichen kann, ist zwar für viele Versuche, aber doch nicht allgemein brauchbar, und man wird daher besser tun, nötigenfalls ein passendes Glas zu bestellen. Das äußere Gefäß findet sich immer in entsprechender Form. Als engere Röhre dient ein Stück einer etwas weiten Barometerröhre *aa*; sie wird durch Kork in den Hals der weiteren gesteckt. Am zweckmäßigsten steckt man mittels Kork an die enge Röhre noch eine hölzerne Scheibe, die auf das weite Gefäß paßt, wodurch dann das engere im weiteren schwebend erhalten wird, oder man setzt das innere Gefäß auf ein paar Stückchen einer etwas dicken Glasröhre. Beim Versuche macht man durch

Fig. 2516.



[1]) Gläserne Gefäße werden hierdurch zersprengt. Ebenso durch ungelöschten Kalk, welcher Wasser anzieht. — [2]) Noch besser wirkt Goldschlägerhaut, doch ist sie weniger widerstandsfähig.

Zugießen den Stand der Flüssigkeiten in beiden Gefäßen gleich hoch, wobei sich leichter eine Wirkung wahrnehmen läßt. Als innere Flüssigkeit ist konzentrierte Kupfervitriollösung ihrer Farbe wegen zu empfehlen, oder mit Kochenille gefärbter Weingeist, als äußere Wasser.

Für einen Versuch mit Schwefelsäure und Wasser sind die bei den konstanten galvanischen Ketten gebräuchlichen Tonzellen sehr zweckmäßig; man braucht sie nur in ein Glasgefäß zu stellen und von den beiden Flüssigkeiten die eine in die Tonzelle, die andere außerhalb derselben einzufüllen.

Ein Darmstück oder eine Blase, welche mit Hühnereiweiß gefüllt ist, schwillt in Wasser gelegt an und platzt schließlich.

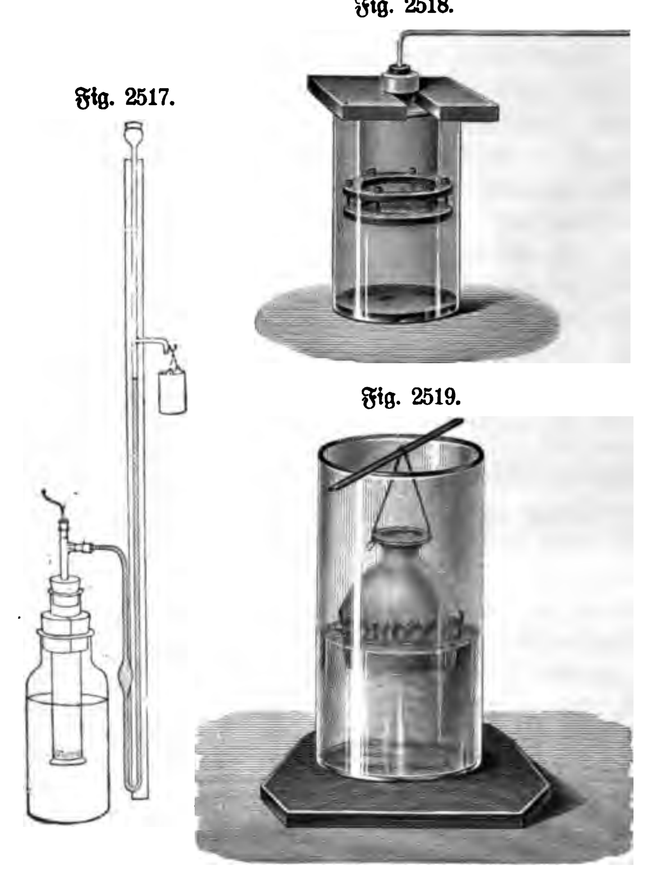


Fig. 2517. Fig. 2518. Fig. 2519.

Formen des Apparates für messende Versuche zeigen die Fig. 2517 (E, 35) und 2518 (K, 8,50).

Der maximal auftretende Druck heißt osmotischer Druck[1]). Er erweist sich proportional der Konzentration, ist also z. B. für 2 proz. Lösung doppelt so groß als für 1 prozentige.

Für 1 proz. Zuckerlösung ist er beispielsweise 555 mm Quecksilber; allgemein für verdünnte Lösungen gleich dem Druck, den die gelöste Substanz im Gaszustand bei derselben Temperatur und demselben Volumen (dem der Lösung) ausüben würde.

225. Dialyse. Man sprengt den oberen Teil einer Flasche ab, schleift die Basis eben mit abgerundeten Kanten und bindet darüber ein befeuchtetes Stück Goldschlägerhäutchen oder (weniger gut) Pergamentpapier entweder durch Umwickeln von Bindfaden oder einfach durch Überstreifen eines ringförmigen Kautschukbandes. In das so vorgerichtete Gefäß (Fig. 2519) bringt man die zu dialysierende Lösung, z. B. eine Mischung von Gummi oder Eiweiß mit Kochsalz u. dergl. und hängt es dann, wie die Fig. 2519 zeigt, in ein größeres Gefäß mit Wasser. Daß hierbei das Kochsalz fast allein durch die Membran wandert und der Gummi rein zurückbleibt, kann man z. B. durch Verdunstenlassen eines Tropfens auf dem Objekt-

[1]) Die Bedeutung desselben wird in dem Kapitel über Thermodynamik besprochen.

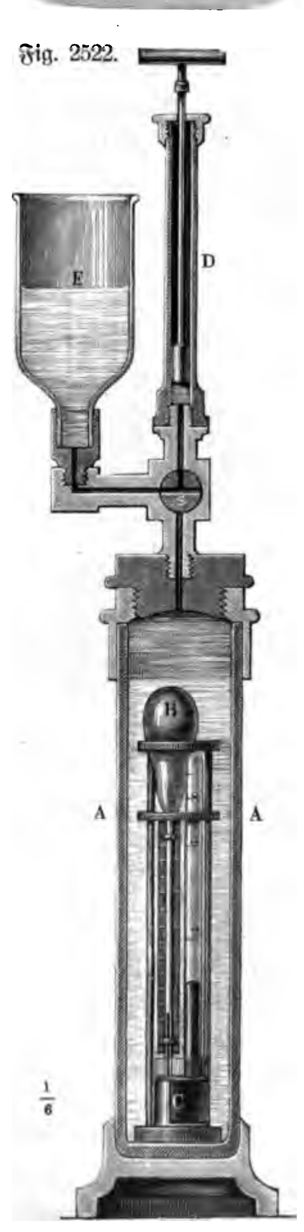
Fig. 2520.



Fig. 2521.



Fig. 2522.



träger eines Mikroskops vor und nach der Dialyse nachweisen. Bequem, namentlich wenn die Lösung auch Stücke fester Körper enthält, ist ein Ring von Guttapercha oder Ebonit (Fig. 2520), den man auf gleiche Weise mit einem Boden aus Pergamentpapier versieht und einfach auf einer größeren Wasserfläche schwimmen läßt. Sollte das Pergamentpapier Fehlstellen haben, so verkittet man diese durch aufgestrichenes Eiweiß, welches man durch Erwärmen zum Gerinnen bringt. Auch Chromatleim, d. h. im Dunklen mit Kalibichromat versetzter Leim, eignet sich zum Verkleben des Pergamentpapiers, da er im Lichte unlöslich wird. Für Lösungsgemische, welche organische Häute angreifen würden, sind gewöhnliche Tonzellen am empfehlenswertesten, doch ist der Effekt 60- bis 75 mal langsamer als bei Goldschlägerhäutchen. Vorteilhaft ist es, die Diaphragmen zuerst unter der Luftpumpe zu evakuieren [1]).

226. Die Zusammendrückbarkeit der tropfbaren Flüssigkeiten kann man durch den Apparat Fig. 2522 zeigen, dessen Behandlung in dem Kapitel von den Dämpfen näher angegeben wird. Für den gegenwärtigen Zweck dient ein Glasgefäß *B*, welches an eine dünne Thermometerröhre angeschmolzen ist, an der sich eine gleichteilige Skala befindet. Durch Abwägen des mit Wasser gefüllten Gefäßes (Füllen wie beim Thermometer) und dann des Gefäßes mit der Röhre bestimmt man das Verhältnis eines Skalenteiles zum ganzen Inhalt. Die Röhre wird nebst einer Manometerröhre in Quecksilber, das sich in einem eisernen Gefäße *C*

[1]) Dialysatoren von verschiedenen Formen (z. B. Fig. 2521) liefert Muencke, Berlin, zu 0,80 bis 7,50 Mk.

befindet, gesetzt und durch gelindes Erwärmen des Gefäßes etwas Wasser ausgetrieben, damit die Quecksilbersäule beim Wiedererkalten in der Thermometerröhre bis auf die Skala reicht. Das Quecksilbergefäß wird dann in das Glasgefäß *A A* gesetzt und in diesem einem Drucke ausgesetzt, wie dieses später beschrieben wird [1]). Aus dem am Manometer abgelesenen Drucke und der Zahl der Skalenteile, um welche das Quecksilber in der Thermometerröhre gestiegen ist, kann man das Maß der Zusammendrückbarkeit der angewendeten Flüssigkeit bestimmen. Das Gefäß *B* führt den Namen Piezometer. Eine andere Art der Ausführung des Apparates zeigt Fig. 2523 Lb, 90.

In einer mehr übersichtlichen und bequemer zu handhabenden Form ist der Apparat von Max Kohl in Chemnitz zu beziehen. Das eingeschlossene Luftmanometer ist durch ein auf den Apparat aufgeschraubtes Federmanometer ersetzt, so daß man viel leichter aus der Ferne den Druck

Fig. 2523.



Fig. 2524.



beobachten kann, und die Pumpe ist nicht oben, sondern seitlich angebracht und fördert das Wasser von unten in den Glascylinder. Letzterer kann vom Boden abgeschraubt werden, so daß man also in aller Bequemlichkeit zunächst das Piezometer aufstellt, alsdann den Cylinder überschraubt und nun erst mittels der Pumpe Wasser einpreßt, wobei man gleichzeitig die eingeschlossene Luft oben entweichen läßt. Ist dies geschehen und hat das Ganze konstante Temperatur angenommen, so kann man mit der Kompression beginnen (Fig. 2524 K, 110).

Für eine größere Zuhörerzahl ist es zweckmäßig, das Gefäß in einen mit Wasser gefüllten Glastrog mit parallelen Wänden aus Spiegelglas einzusetzen und den Stand des Quecksilbers im halb verfinsterten Zimmer auf einen Schirm zu projizieren. Durch gleichzeitige Projektion eines Millimetermaßstabes aus Glas er-

[1]) Anstatt durch die Pumpe kann der Druck auch durch Anschließen an die Wasserleitung hervorgebracht werden.

hält man die Möglichkeit, die Gefäßdimensionen auf dem Projektionsschirm mittels des Zirkels auszumessen und hierdurch den Versuch zu einem quantitativen zu gestalten.

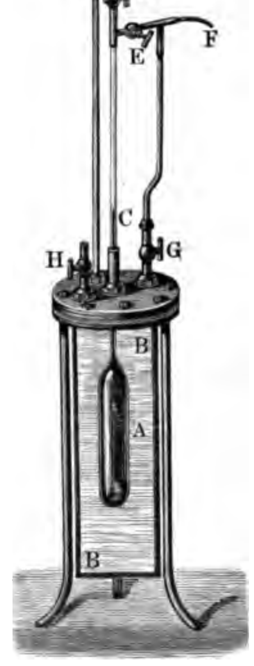
Ein Apparat, der ganz speziell für Projektion mittels des Skioptikons eingerichtet ist, wird von Stöhrer in Leipzig nach Weinholds Angaben geliefert. Der Druck wird bei diesem Apparate nicht durch Wasser, sondern durch Luft ausgeübt, was wesentlich bequemer ist als die Anwendung von Wasser, solange nur geringer Druck verlangt wird. Bei größerem Druck liegt die Gefahr nahe, daß bei etwaigem Zerspringen des Gefäßes durch umherfliegende Glassplitter Unheil angerichtet werde, was bei Anwendung von Wasser nicht zu befürchten ist. (S, 40.)

Von manchen Physikern wird der Regnaultsche Apparat vorgezogen, bei welchem die Röhre des Piezometers aus dem Cylinder hervorragt und mit dem Inhalt des Cylinders durch eine zweite Röhre in Verbindung gesetzt oder auch davon getrennt erhalten werden kann. Man erreicht so den Vorteil, demonstrieren zu können, wie sich das Gefäß zusammenzieht, wenn ein einseitiger Druck von außen wirkt (Fig. 2525 Lb, 130 [1]).

Fig. 2526.



Fig. 2525.



Nennt man die Volumenabnahme v, das ursprüngliche Volumen V und den Druck p, so ist

$$v = \alpha . V . p,$$

α heißt der Kompressibilitätskoeffizient, der reziproke Wert desselben Kompressionsmodul oder Modul der Volumenelastizität.

Mißt man wie gewöhnlich den Druck in Kilogramm pro Quadratcentimeter, so ist α für Wasser bei gewöhnlicher Temperatur 46.10^{-6}, für Chloroform 70.10^{-6}. In technischen Einheiten, d. h. bei Messung des Drucks in Kilogramm pro Quadratmeter wären die Werte 10^4 mal kleiner. In absoluten CGS-Einheiten ist α bei 18° für:

Äther	Alkohol	Benzol	Quecksilber	Wasser
0,000186	0,000110	0,000090	0,0000039	0,000046.

Der Kompressibilitätskoeffizient ist keine wirkliche Konstante, er nimmt vielmehr mit dem Druck ab. Beispielsweise ist er für Wasser bei 100 Atm. $47{,}5.10^{-6}$, bei 3000 Atm. $26{,}1.10^{-6}$. Für Alkohol bei denselben Drucken: $76{,}9.10^{-6}$ und $28{,}4.10^{-6}$, für Äther $107{,}2.10^{-6}$ und $31{,}7.10^{-6}$. Wäre der Koeffizient eine wahre Konstante, so könnte man den Kompressionsmodul definieren als den Druck, der notwendig ist, das Volumen auf Null zu reduzieren.

[1]) Über ein Piezometer, welches sowohl zur Kompression, wie zur Dehnung von Flüssigkeiten gebraucht werden kann, siehe Pizzarello, Beibl. 23, 609, 1899.

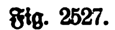
Um die Kompressibilität zweier verschiedener Flüssigkeiten direkt miteinander vergleichen zu können, wird dem Apparat Fig. 2524 ein Einsatz wie Fig. 2526 (K, 30) beigegeben.

227. **Lösung und Kristallisation durch Druck.** Die Löslichkeit von Körpern, welche sich unter Ausdehnung auflösen, wird durch Druck verringert, diejenige von solchen, die sich unter Kontraktion lösen, vergrößert. Es kann dies nachgewiesen werden mittels der Cailletetschen Pumpe (siehe Verflüssigung der Gase), welche man durch ein Kupferkapillarrohr mit einem etwa 0,5 mm weiten, einseitig geschlossenen Glaskapillarrohr durch geschmolzenen Schellack, dem etwas venetianischer Terpentin beigemischt ist, verbindet, nachdem man in dasselbe eine Lösung nebst einigen Kristallen derselben Substanz eingefüllt hat. Beim Einfüllen verfährt man so, daß man in das zunächst beiderseits offene Kapillarrohr etwas warm gesättigte Lösung einsaugt und einen kurzen Quecksilberfaden nachfolgen läßt, indem man während des Saugens das Röhrchen in einen in die Flüssigkeit eingebrachten Quecksilbertropfen eintauchen läßt. Schließlich schmilzt man das Röhrchen dicht hinter dem Quecksilberfaden zu und kittet es dann mit dem anderen Ende in die Kupferkapillare ein. Die Kupferkapillare muß hinreichend beweglich sein, um das Kapillarrohr auf den Objektträger eines Mikroskops auflegen zu können. Man tropft etwas Wasser oder Glycerin auf und bedeckt mit einem flachen Uhrglase, die konkave Seite nach oben gerichtet. Bei Anwendung von Triphenylmethan in Alkohol steigt der Sättigungspunkt durch Druck, d. h. die Kristalle beginnen zu wachsen.

Braun (1886) bediente sich des folgenden Apparates: ein schmiedeeiserner Block von 11,4 cm Länge und einem Querschnitt von 6 × 6 cm enthält im Inneren einen U-förmigen Hohlraum. Der eine der beiden Schenkel dieses Hohlraumes ist ein schwach konisch sich verjüngender Kanal von 0,75 cm Durchmesser. Derselbe ist unten durch eine Schraube mit untergelegtem Kupferring geschlossen. Der Druck wird dadurch erzeugt, daß mittels Schraube mit langem Schlüssel, welche zunächst auf ein Stahlstäbchen von 2,2 cm Länge wirkt, ein cylindrischer Kupferbolzen in den Kanal hineingepreßt wird. Mit diesem Kompressionskanal kommuniziert, wie bemerkt, das Reservoir für die Salzlösung, bestehend aus einem dem ersten parallelen Kanal von 10 cm Länge und 0,85 cm Durchmesser. Die Verschlüsse werden durch Stahlschrauben mit kupfernen Dichtungsringen bewirkt. Beim Versuche wird der Eisenklotz, die Kanäle vertikal, in einen Holzeimer gestellt und an einem darin befestigten eisernen Gestell angeschraubt. Ringsum wird Schnee von 0° aufgeschichtet. Die Salzlösungen befinden sich in Gefäßen, die ebenfalls von Schnee umgeben sind. Die Temperatur des Raumes darf nur wenig über 0° betragen, die Versuche können somit, falls sich der Raum nicht künstlich kühlen läßt, nur im Winter ausgeführt werden.

Bringt man Alaun oder Natriumsulfatkristalle nebst Lösung in den Apparat und läßt denselben 12 bis 48 Stunden unter Druck stehen, so zeigen sich beim Öffnen die Kristalle angefressen und die Lösung setzt nach einigem Stehen Kristalle ab. Bei Chlorammonium scheiden sich umgekehrt Kristalle aus, bei Chlornatrium tritt bei geringem Druck Auflösen, bei stärkerem Wachsen der Kristalle ein. (Festwerden von Gesteinen bei wechselndem Druck.)

Fig. 2527 zeigt einen geplanten, nicht wirklich ausgeführten Apparat zur Demonstration des Einflusses von Druck auf Lösungen mittels des Projektionsmikro-


Fig. 2527.

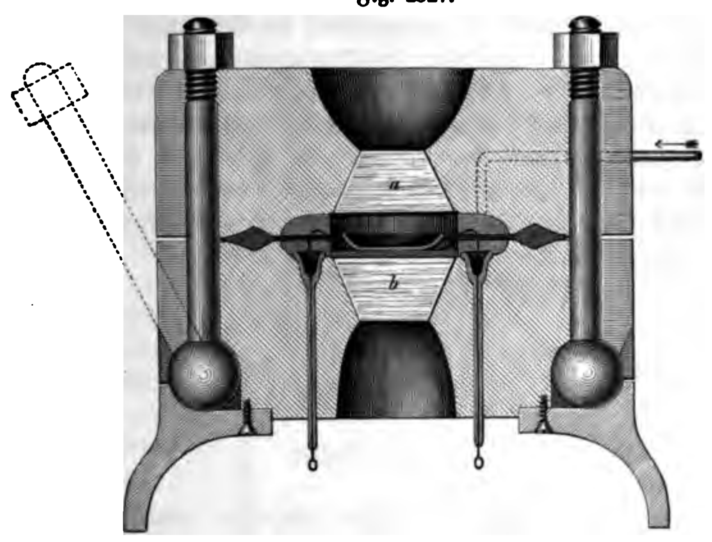
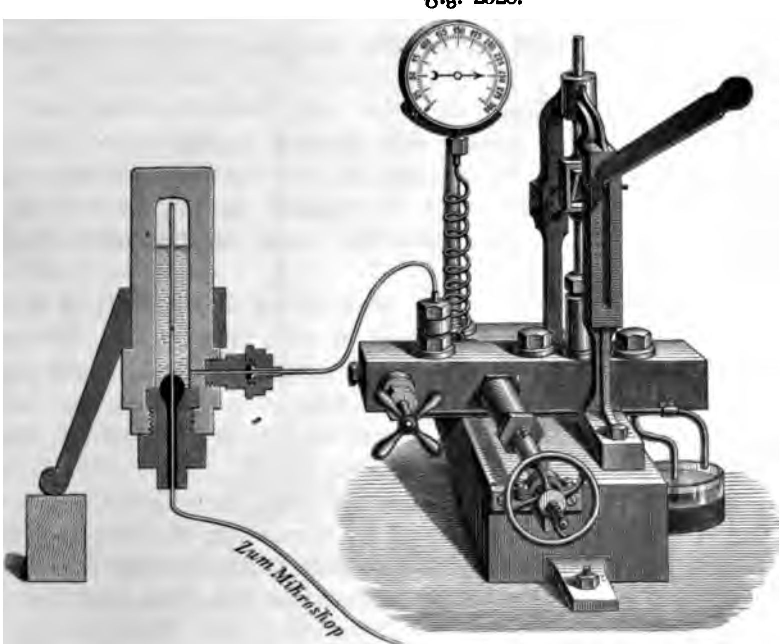


Fig. 2528.



skops. Die Einrichtung ist wohl ohne weiteres verständlich. Zwei Elektroden dienen für die später zu besprechenden elektrolytischen Versuche. Zur Erzeugung des Drucks könnte eine Cailletetsche Pumpe wie Fig. 2528 gebraucht werden.

Man könnte mit dem Apparate auch die Änderung der Mischbarkeit von Flüssigkeiten, sowie die Änderung der gemeinschaftlichen Oberflächenspannung infolge des Drucks zeigen.

228. Erhaltung der Materie. Von besonderem Interesse ist, daß das Gewicht einer Glasröhre, in welche zwei sich chemisch vereinigende Körper eingeschlossen

[illegible]

[illegible] Mangel einer [illegible] Kohlensäure aus einer [illegible] Wasser oder Öl. Daß [illegible] durch die Entzündbarkeit bezw. [illegible]

[illegible] keine Tropfen bilden, zunächst darin [illegible] an der Grenze von Gas und Luft Null ist. [illegible] die Luft beseitigt werden, oder man muß [illegible] Dies geschieht am einfachsten durch den Versuch [illegible]

[illegible] Versuch von **Torricelli**. Man nimmt eine etwa 80 cm lange [illegible] Glasröhre, die man einerseits zuschmilzt; sie muß [illegible] aufbewahrt werden. Ist nämlich die Röhre unrein, [illegible] hängen und diese steigt dann in Blasen auf, so[illegible] gefüllte Röhre umkehrt und in das Quecksilbergefäß [illegible] kleine Wanne von Porzellan (event. ein Trinkglas), [illegible] daß man die mit dem Zeigefinger verschlossene Röhre [illegible] bringen kann (Fig. 2529 K, 2,5).

Die Röhre wird durch einen aus Schreibpapier nach der früher (S. 580) angegebenen Weise gedrehten Trichter gefüllt, oder es muß das Quecksilber vorher durch einen solchen Trichter gereinigt werden, in welchem Staub und Oxydhäutchen fremder Metalle zurückbleiben. Noch besser reinigt man das Quecksilber nach einer der anderen früher angegebenen Methoden durch Chemikalien oder durch Destillation [1]).

Ist die Röhre bis auf etwa 1,5 cm gefüllt, so verschließt man sie mit dem Finger und läßt die so eingeschlossene Luftblase durch Umkehren der Röhre ein- oder zweimal durch die ganze Röhre laufen, um einzelne kleine an der Röhre hängende Luftblasen zu sammeln. Die Röhre wird nun eben voll gemacht, mit dem Finger verschlossen und in das Quecksilbergefäß umgekehrt und zwar zunächst nicht in senkrechter Stellung, sondern so schräg geneigt, daß das Quecksilber oben ansteht. Eine Luftblase von minimaler Größe wird sich dort stets noch vorfinden. Ihre Kohäsion scheint im stande zu sein, die darunter befindliche Quecksilbersäule zu tragen. Richtet man nun die Röhre mehr und mehr auf, so scheint die Blase plötzlich zu zerreißen, sobald die Höhe 760 mm beträgt. Diese Quecksilberhöhe scheint somit das Maß der Kohäsion der Luft zu sein.

Fig. 2529.

Fig. 2530.

$\frac{1}{10}$

Fig. 2531.

Das ist aber unmöglich, denn wäre die Deutung der Erscheinung richtig, so wäre nicht einzusehen, weshalb die Quecksilbersäule auf 760 mm Höhe stehen bleibt und nicht ganz herunterfällt. Es bleibt nur übrig, die Erscheinung mit Torricelli als Wirkung des Luftdrucks zu deuten.

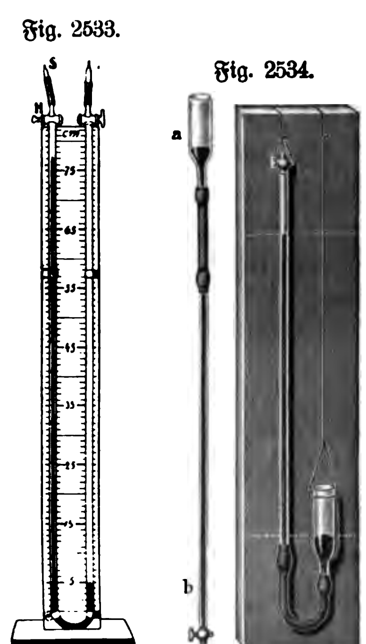
Will man denselben Versuch mit vertikal stehender Röhre ausführen, so muß man dazu ein sehr tiefes Quecksilbergefäß benutzen, wie es in den Fig. 2530 und 2531 dargestellt ist, nämlich eine etwa 2 bis 4 cm weite und etwa 70 cm hohe Glasröhre, welche einerseits verschlossen, anderseits trichterförmig erweitert ist. Sie wird, um sie vor dem Umstoßen möglichst zu sichern, in ein Gestell gebracht, wie Fig. 2530 im Durchschnitt zeigt. Die obere Erweiterung kann eventuell auch so hergestellt

[1]) Das Quecksilber für solche Versuche bewahrt man besonders auf, weil dasjenige, welches im allgemeinen und namentlich für elektrische Versuche gebraucht wird, bald mit fremden Metallen verunreinigt ist.

werden, daß man von einem passenden zerbrochenen Glasgefäße den Boden abnimmt und die weite Röhre mittels Kork und Siegellack in den Hals des Gefäßes kittet. Jede hinreichend weite Glasröhre kann zum Versuche dienen, selbst wenn man nicht im stande wäre, sie an einem Ende zuzuschmelzen. Im letzteren Falle kittet man die Röhre mit reichlichem Siegellack in das vorher ausgekittete Loch des Bodens von Fig. 2530. Mechaniker fertigen dieses Gestell in der Regel etwas zierlicher aus Eisen (Fig. 2531 K, 40).

Warburg benutzt eine U-förmige Glasröhre mit etwa 1 m langen Schenkeln. Einer der Schenkel ist am Ende mit einem Hahn versehen. Die Röhre wird etwas über eine halbe Höhe mit Quecksilber gefüllt, dieses durch Neigen der Röhre in den mit Hahn versehenen Schenkel getrieben, nun der Hahn geschlossen und die Röhre wieder vertikal gestellt.

Indem man auch den zweiten Schenkel mit einem Hahn versieht und unten an der Biegung einen Schlauch mit beweglichem Quecksilbergefäß anbringt, könnte man leicht zeigen, wie zunächst dem Gesetz der kommunizierenden Röhren entsprechend das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch steht, aber beim Öffnen des einen in diesem heruntergedrückt wird. Auch der später zu besprechende Apparat Fig. 2785, S. 1017, zur Demonstration des Verhaltens ungesättigter Dämpfe könnte hierzu Verwendung finden.


Fig. 2532. Fig. 2533. Fig. 2534.

Einen anderen Apparat zu gleichem Zwecke zeigt Fig. 2532 (E, 53) nach E. W. G. Schulze. Öffnet man hier den Hahn rechts und nimmt nach Herstellung der Barometerhöhe das Gefäß fort, so tropft etwas Quecksilber aus, somit überwiegt der Luftdruck und drückt die Säule hinauf.

K. T. Fischer (1902) versieht die beiden Schenkel eines sehr langen Doppelbarometers unten mit Hähnen, schließt diese nach der Füllung, d. h. nachdem die Enden wie beim Torricellischen Versuch unter Quecksilber getaucht waren, ab und kehrt das Doppelbarometer um. Das Quecksilber steht alsdann in beiden Schenkeln gleich hoch. Öffnet man nun den einen Hahn, so wird es im geschlossenen Schenkel um Barometerhöhe hinauf getrieben [1]), Fig. 2533.

R. Neumann (Z. 15, 291, 1902) empfiehlt die in Fig. 2534 dargestellte, wohl ohne weiteres verständliche Anordnung, wobei man mit sehr wenig Queck-

[1]) K. T. Fischer, Neuere Versuche der Mechanik fester und flüssiger Körper, Leipzig, Teubner, 1902, S. 45.

silber auskommt. Die Füllung erfolgt in der Stellung *ab*, die Ablesung der Barometerhöhe in der rechts gezeichneten Lage. Der Schlauch muß dickwandig sein und mit weichem Eisendraht festgebunden werden.

Wäre nun tatsächlich die Kohäsion des Gases die Ursache, weshalb die Blase ihr Volumen nicht merklich vergrößert bis zu einer Quecksilberhöhe von 76 cm, so wäre, wie gesagt, nicht einzusehen, weshalb nach dem Zerreißen das Quecksilber noch auf dieser Höhe stehen bleibt und nicht vollkommen herunterfällt. Ferner wäre nicht einzusehen, weshalb man nicht den Riß im Gase sieht, vorausgesetzt, daß das Gas eine Oberflächenspannung besitzt.

Da keinerlei Grenze des Gases im Torricellischen Vakuum zu sehen ist, da man auch bei Anwendung von gefärbtem Gas, z. B. Brom, sich davon überzeugen kann, daß sich das Gas auf den ganzen Raum ausdehnt, so folgt, daß nicht nur keine Oberflächenspannung bei Gasen existiert und keine Kohäsion, daß ihnen im Gegenteil eine Art negativer Kohäsion zukommt, die man sich zunächst deuten kann als Abstoßungskraft zwischen den Molekülen (vergl. S. 739), das sogenannte Expansivvermögen.

Zur Erläuterung, weshalb die Quecksilbersäule auf 76 cm stehen bleibt, kann man an die S. 817 besprochene konzentrische Anordnung kommunizierender Gefäße erinnern.

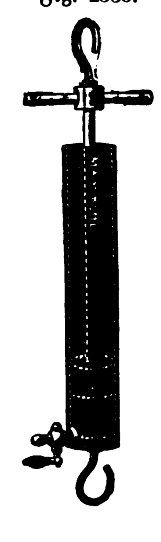
J. Ducrue (1885) empfiehlt alsbald nach Anstellung des Torricellischen Grundversuchs zu zeigen, wie durch Vermehrung oder Verminderung des äußeren Luftdrucks ein Steigen resp. Fallen der Quecksilbersäule bewirkt wird. Zu diesem Zwecke würde man dem Apparate wohl zweckmäßig die Form des Heberbarometers geben, dessen Schenkel aber wesentlich länger sind, als die eines gewöhnlichen Heberbarometers. In den offenen Schenkel wird ein Kolben eingeschoben, der sich luftdicht verschieben läßt. Der Stiel desselben ist aus einer Kapillarröhre gebildet und am Ende durch einen kleinen Stöpsel verschließbar. Der geschlossene Schenkel ist nicht durch Zuschmelzen geschlossen, sondern nur verengt durch einen eingeschliffenen Stöpsel, der von einer trichterförmigen Erweiterung umgeben ist[1]). Beim Füllen entfernt man den Stöpsel und auch den Kolben, gießt durch den offenen Schenkel Quecksilber ein, treibt dieses nun in dem verschließbaren Schenkel durch Luftdruck empor, bis es im Trichter erscheint und schiebt den Stöpsel ein. Beseitigt man jetzt den Druck wieder, so stellt sich der gewöhnliche Barometerstand her. Hierauf schiebt man den Kolben mit offenem Stiel ein bis in mittlere Lage über dem Quecksilber und verschließt den Stiel durch Einsetzen des in den Stiel passenden Stöpsels. Durch Emporziehen oder Niederdrücken des Kolbens kann man nunmehr den Druck der Luft im offenen Schenkel ändern und dadurch die Höhe der Quecksilbersäule vermehren oder verringern. Recht instruktiv erscheint es, auch auf das Quecksilber im offenen Schenkel eine Säule Wasser aufzugießen und so eine Druckerhöhung außen herbeizuführen. Das Quecksilber wird dann um $^1/_{13}$ der zugegossenen Wasserhöhe steigen. Man kann auch darauf aufmerksam machen, wie auf solche Weise das spezifische Gewicht der Flüssigkeiten zu erhalten ist. (E, 25.)

Auch ohne Anwendung von Quecksilber kann man die scheinbare Kohäsion der Gase, d. h. die Größe des Luftdruckes, demonstrieren mit dem in Fig. 2535 (K, 18) abgebildeten Apparate. Sobald das scheinbare Durchreißen eintritt, fällt das an

[1]) Vergl. O. Lehmann, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 2, 77, 1882.

den Cylinder angehängte Gewicht wie beim Durchreißen eines Drahtes mit dem Cylinder herunter, es steigt aber wieder hinauf, wenn es erheblich verkleinert wird.

Fig. 2535.

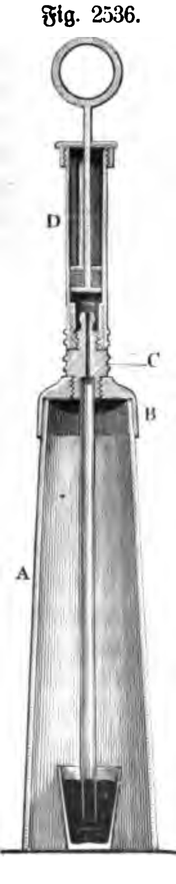


Wegen der Anwendung des abgekürzten Barometers u. s. w. macht man den Torricellischen Versuch zweckmäßig auch noch mit einer Röhre, welche weniger als 76 cm lang ist.

Ein anderer hierher gehöriger Versuch ist folgender: Wenn man ein Trinkglas mit eben geschliffenem Rande genau voll Wasser füllt, sodann so mit einem Blatte Schreibpapier bedeckt, daß keine Luftblase unter dem Papier bleibt, alsdann ein Brettchen oder ein Buch auf das Papier legt und das Glas umkehrt, so kann man es nun verkehrt aufheben, ohne daß die Flüssigkeit ausfließt. Setzt man das Glas auf den Tisch, so kann man selbst das Papier darunter hervorziehen, wieder frisches Papier darunter bringen, das Glas von dem Tische wieder auf das Brettchen schieben und mit diesem wieder aufrecht stellen. Nur muß man entweder ein gut steifes Papier, oder ein solches nehmem, das nur wenig größer ist als das Glas, sonst könnte der Versuch möglicherweise nicht gelingen.

Nimmt man eine einerseits verschlossene, anderseits ebengeschliffene, nicht über 1 cm weite Glasröhre zum Versuche, so kann man nach dem Umkehren das Papier wegziehen, ohne daß das Wasser ausläuft. Geschieht dies doch, so dringt zugleich Luft ein.

Fig. 2536.



231. Die Kolbenpumpen. Senkt man eine Glasröhre, welche unten offen, oben mit einem sich nach außen öffnenden Ventil versehen ist, in ein mit Wasser gefülltes tiefes Gefäß, wie Fig. 2530, so entweicht die Luft durch das Ventil und beim Herausziehen der Röhre bleibt das Wasser darin hängen. (Auffangen von Gasen über der pneumatischen Wanne.)

Statt nun die Röhre zu bewegen, kann man einfacher, wie bei dem Apparat Fig. 2536, nur einen Kolben bewegen. Statt Wasser findet dabei Quecksilber Anwendung.

In beiden Fällen ist unnötig, daß die Luft ganz entfernt wird, die Röhre braucht also nicht ihrer ganzen Länge nach in Wasser (bezw. Quecksilber) einzutauchen. Dies wäre allerdings nötig, wenn die alte, auch noch von Galilei geäußerte Ansicht richtig wäre, daß das Wasser beim Aufziehen des Pumpenkolbens durch Adhäsion und Kohäsion an diesem hängen bleibt.

Die Glocke A (Fig. 2536) dient nicht nur als Ständer zum Halten der Pumpe und Röhre, sondern kann auch nach Besprechung der Luftpumpe als Recipient benutzt werden, um zu zeigen, daß nach Beseitigung der Luft die Pumpe nicht mehr wirkt. Die Ventile in dem Zwischenstück C und in dem Kolben (Fig. 2537) werden aus Wachstaffet oder Kautschuk hergestellt. Will man nur zeigen, daß beim Emporziehen des Kolbens das Quecksilber in der Röhre steigt, so sind sie natürlich überflüssig.

Bei den gewöhnlichen Pumpbrunnen besteht der Kolben aus einem Lederstulpen, der nur unterhalb um einen hölzernen, durchbohrten und mit Ventil versehenen Kolben angenagelt ist. Das zweite Ventil befindet sich entweder unten am Cylinder oder an der Steigröhre.

Will man sich ein einfaches Modell der Saugpumpe selbst anfertigen, so nimmt man dazu eine höchstens 2 cm weite starke Glasröhre *AB*, Fig. 2538, schiebt in dieselbe einen recht reinen, um die Mitte herum mehrfach fein durchbohrten Kork *C*, auf welchen an einer Seite ein denselben bedeckender Lappen von vulkanisiertem

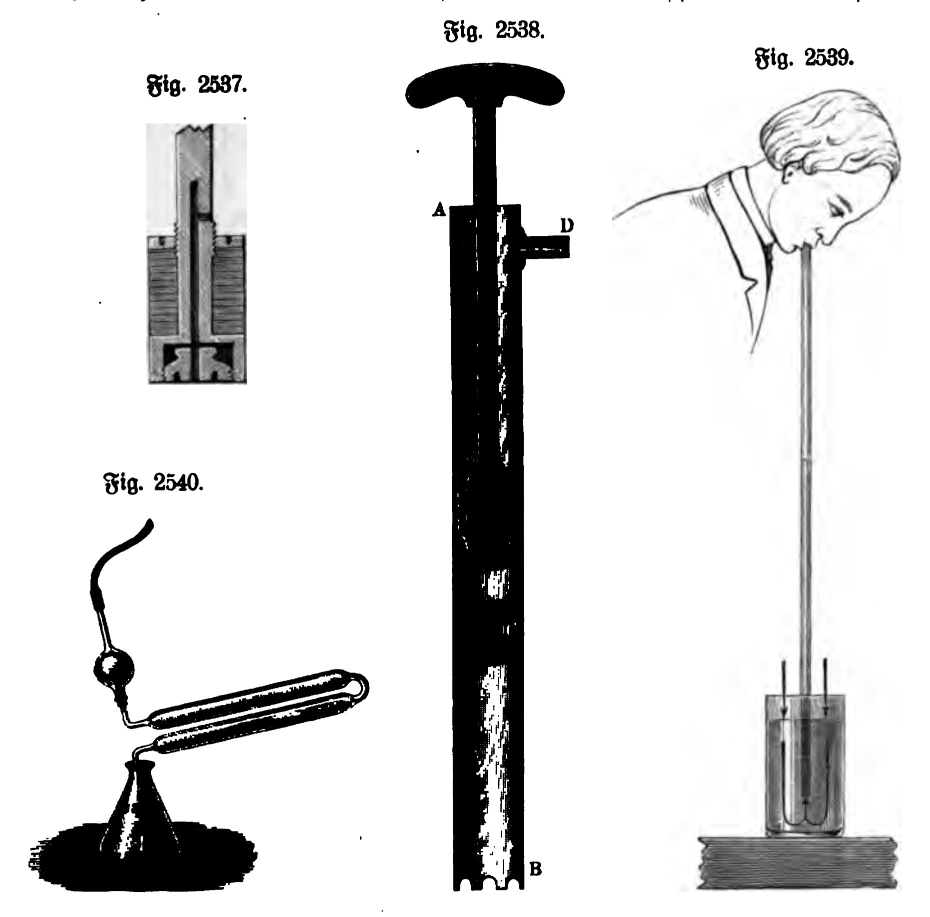


Fig. 2537. Fig. 2538. Fig. 2539. Fig. 2540.

Kautschuk angenagelt ist. Kolben, Kolbenstange und Griff werden aus Holz gemacht, wie die Figur zeigt, und um den hölzernen Kolben unten ein in die Glasröhre passendes Stück von einem Kautschukrohre gebunden. Der Kolben braucht nicht durchbohrt zu sein, da der hölzerne Kolben namhaft enger ist, als die Öffnung des Kautschukrohres und das Wasser also zwischen der Glasröhre und dem Kautschuk aufsteigen kann, wenn der Kolben niedergeht. Die Ausflußröhre *D* ist nicht gerade nötig, man kann die Pumpe auch überfließen lassen, und für den Einfluß werden sich leicht unterhalb ein paar Öffnungen ausbröckeln lassen. Damit der Pfropf *C* gut schließt, muß man denselben durch Klopfen mittels eines hölzernen Hammers recht weich machen und die Röhre auf jener Seite, durch welche man den Pfropf eintreiben will, etwas ausfeilen. Ist er an seiner Stelle, so überzieht man den

Rand mittels eines Pinsels mit Siegellacklösung, um sicherer einen luftdichten Verschluß zu erzielen.

Die primitivste Saugpumpe bildet die Mundhöhle, in welcher beim Saugen die Zunge als Kolben wirkt (Fig. 2539). Man kann z. B. die Füllung eines Pyknometers durch Saugen (Fig. 2540 K, 4,5) als Beispiel demonstrieren [1].

Der scheinbare horror vacui läßt sich zeigen, indem man eine Flasche mit Sand oder Quecksilber füllt und sie umgekehrt in ein Gefäß mit Wasser hängt (Fig. 2544 K, 3).

Fig. 2542.

Fig. 2541.

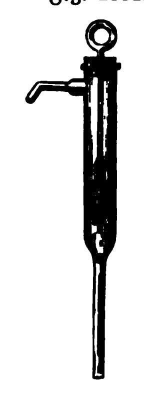


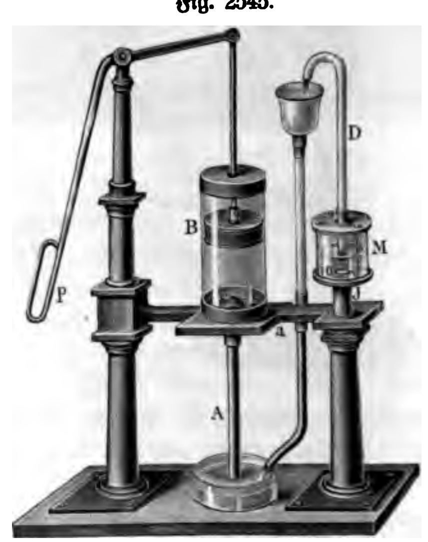
Fig. 2544.



Fig. 2543.



Fig. 2545.



232. **Saug- und Druckpumpe.** Bei der einfachen **Druckpumpe** dringt das Wasser durch eine seitliche Öffnung oben im Stiefel ein und wird dann abgeschlossen

[1]) Verschiedene käufliche Modelle der Saugpumpe sind in den Fig. 2541 u. s. w. dargestellt, zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln. Die Kölbchen bei den kleineren Modellen sind mit Faden umwickelt. Man muß sie vor dem Gebrauche in Wasser legen, damit sie gehörig schließen. (Fig. 2541 Lb, 2,50; Fig. 2542 Lb, 11; Fig. 2543 Lb, 75.)

dadurch, daß der Kolben unter diese Öffnung kommt. Ein durchsichtiges Modell einer Saug- und Druckpumpe ist dargestellt in Fig. 2545 (I.b, 75).

Fig. 2546 zeigt eine doppelt wirkende Pumpe. Der Raum unter dem Kolben funktioniert als Saugpumpe, der darüber stehende als Druckpumpe. (Albert, Frankfurt a. M., 36 Mk.)

Fig. 2546. Fig. 2547.

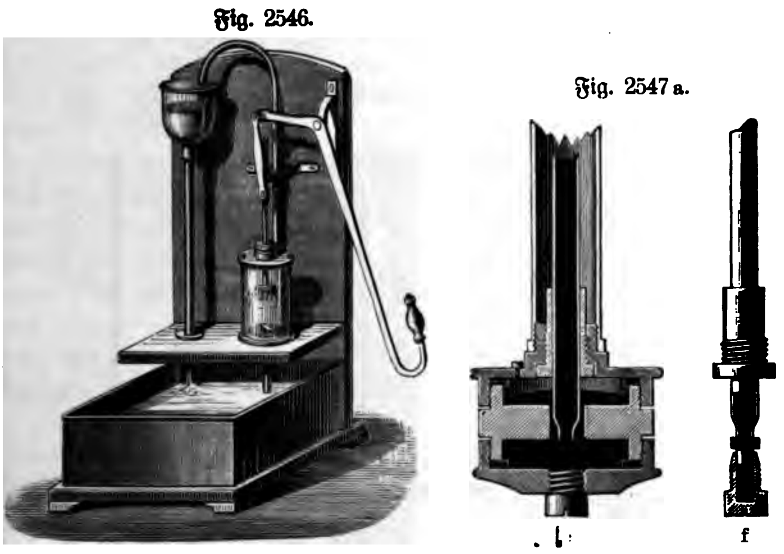


Fig. 2547 a.

233. Das Barometer. Die beste heutige Bezugsquelle für Barometer ist die Firma R. Fueß, Berlin-Steglitz, deren Barometer sich einer außerordentlichen Verbreitung erfreuen und auf den meteorologischen Stationen der ganzen Erde (mit Ausnahme derjenigen von Frankreich) Eingang gefunden haben.

Unter den zahlreichen Formen von Barometern, welche diese Firma herstellt (unter welchen sich auch ein Normalbarometer zum Preise von 260 Mk. befindet), dürfte das für nicht allzuweit gehende Ansprüche geeignetste das Stationsinstrument der deutschen und russischen meteorologischen Stationen sein, von welchem die Fig. 2547 und 2547 a eine Abbildung geben. (Preis 110 Mk.) Es ist ein Gefäßbarometer und das Niveau des Quecksilbers befindet sich etwa in halber Höhe des oberen Abschnittes des Gefäßes, Fig. 2547 a. Die Millimeterteilung ist entsprechend dem Querschnitte der Barometerröhre und dem des Gefäßes reduziert, so daß also das Instrument, was sehr bequem ist, nur einer Ablesung oben am Visier bedarf. Um das Barometer transportfähig zu machen, läßt man durch Neigen des Instruments das Quecksilber vorlaufen, bis es die Röhre ganz ausfüllt, kehrt dann das Instrument um, schraubt die Schraube *e* aus der Bodenplatte des Gefäßes heraus und ersetzt sie durch eine andere *f*, in welche ein federnder Bolzen eingesetzt ist, der die Mündung der Röhre verschließt.

Verschiedene andere Formen von Barometern sind dargestellt in den Figuren 2548 K, 40; 2549 Lb, 150; 2550 K, 30.

Ein einfaches Heberbarometer, Fig. 2551, welches besonders zur Demonstration geeignet sein dürfte, liefern Leybolds Nachf. Köln zu 25 Mk.

Bei der Beobachtung des Barometers muß, selbst wenn die Röhre eine verhältnismäßig weite ist (nicht unter 4 bis 5 mm), stets das Quecksilber durch leises Anklopfen erschüttert werden, um den richtigen Stand zu erhalten. Das Ablesen geschieht über die gewölbte Kuppe des Quecksilbers und man muß das Auge in dieselbe Höhe bringen, welche diese Kuppe hat, um den parallaktischen Fehler zu vermeiden. Letzteres läßt sich besonders gut erreichen, wenn man hinter der Röhre einen Streifen von einem gewöhnlichen Spiegel anbringt, weil das Auge sicher die rechte Stellung hat, wenn das Spiegelbild der Quecksilberkuppe mit dieser sich deckt. Ein Nonius an der Skala ist nur dann entbehrlich, wenn die Teilung in Millimetern gemacht ist und man schon Übung im Schätzen von Zehnteln erlangt hat. Bei jeder Beobachtung muß das Barometer senkrecht hängen. Während des Nichtgebrauchs stellt man die Barometer dagegen meist schief, damit die Quecksilberoberfläche nicht an der Stelle, wo sie bei Messungen steht, die Glaswand treffe und dieselbe verunreinige (Fig. 2553). Bei einer anderen Ausführungsform kann die Stellung des Quecksilbers durch eine Schraube, welche auf einen das Rohr unten abschließenden Lederbeutel wirkt, verändert werden, so daß es in *beiden* Schenkeln *steigt*.

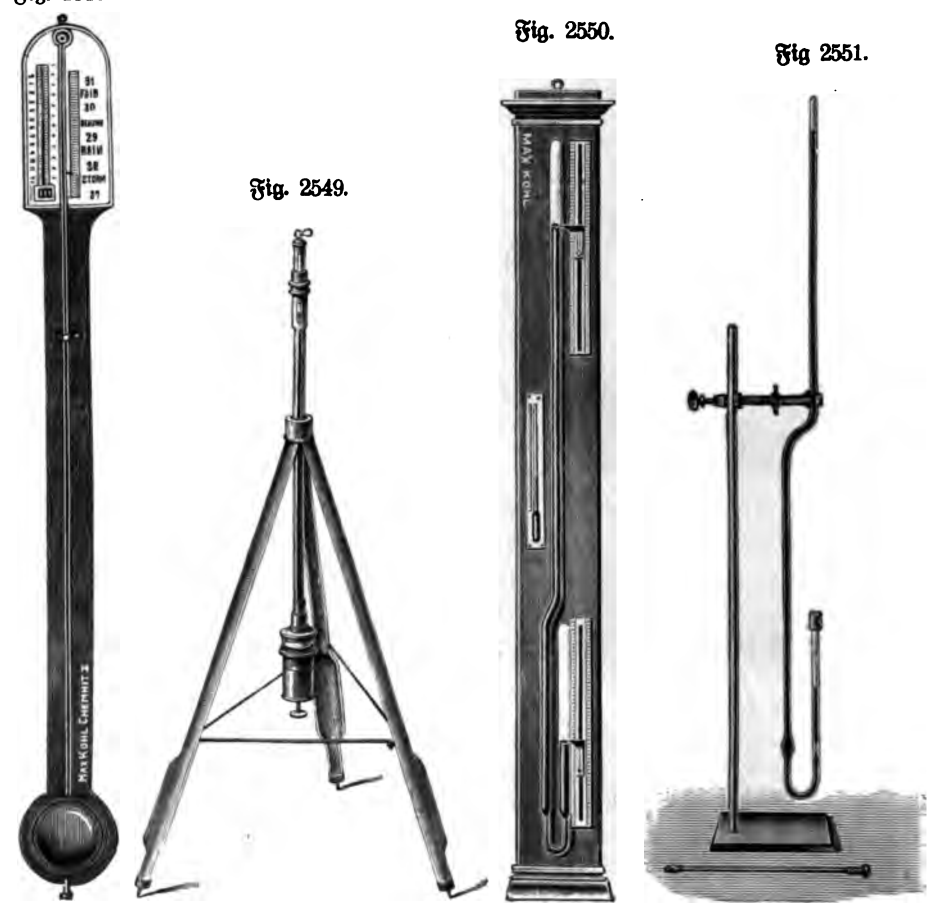


Fig. 2548. Fig. 2549. Fig. 2550. Fig 2551.

Kauft man ein gewöhnliches Gefäßbarometer, so muß man sich jedenfalls durch sorgfältiges Nachmessen versichern, daß der vorhandene Teil der ganzen Skala

seine richtige Entfernung vom Stande des Quecksilbers im Gefäße habe, und, wenn nicht, durch Zugießen oder Entfernen von Quecksilber oder auch durch Verrücken des Barometers auf seinem Brette diese Entfernung berichtigen, selbst wenn dadurch die etwa dabei befindliche Wetterskala unrichtig werden sollte. Letztere hat immer beim mittleren Stand des Barometers die Bezeichnung „veränderlich“ und dann aufwärts für jeden folgenden Viertelzoll (1 Zoll = 30 mm) „schön“, „beständig“, „sehr trocken“ und abwärts „Regen oder Wind“, „viel Regen“, „Sturm“, und kann daher leicht hergestellt werden, wenn man den mittleren Barometerstand kennt und — wenn jemand etwas daran liegt.

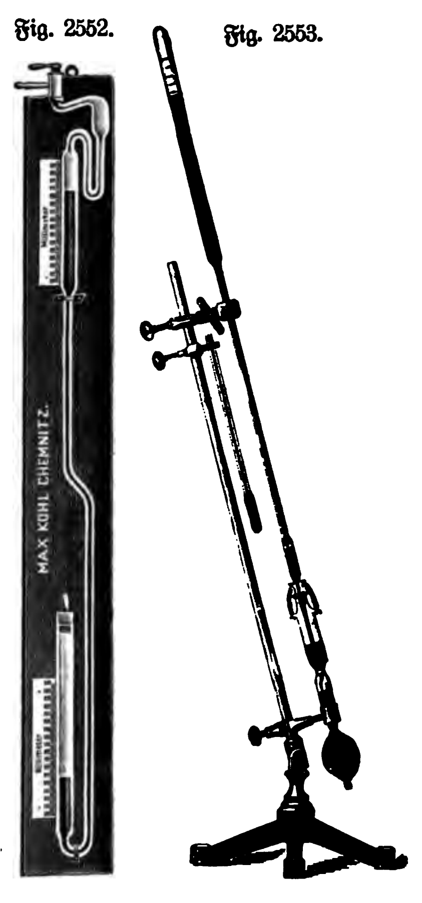


Fig. 2552. Fig. 2553.

Außer der Skala muß man auch untersuchen, ob das Barometer über dem Quecksilber luftleer ist; man neigt dasselbe zu dem Zwecke langsam, bis sich das Quecksilber auf etwa 1 cm dem Glasverschlusse genähert hat und dann etwas schneller. Das Quecksilber muß mit hellem Schalle an das Glas anschlagen und nicht nur keine Luftblase zeigen.

Bei der in Fig. 2552 (K, 30) dargestellten Form läßt sich eine vorhandene Luftblase leicht durch Hinübertreiben in den angesetzten Behälter vertreiben.

Bei dem in Fig. 2553 abgebildeten Instrument [1]) ist eine Luftfalle angebracht, um zu verhindern, daß bei den Schwankungen der Quecksilbersäule die zwischen Quecksilber und Glaswand befindliche Luftschicht nach und nach in den leeren Raum getrieben wird.

Schwieriger zu erkennen und zu beseitigen ist Wasserdampf, welcher sich nur bei größerer Menge durch Bildung eines Beschlages beim Neigen des Barometers bemerkbar macht.

Soll ein Barometer vom Platze gebracht werden, so muß es jedenfalls zuerst so weit langsam geneigt werden, bis das Quecksilber die Röhre ganz ausfüllt, und dann erst wird der Verschluß angebracht, wenn ein solcher vorhanden ist. Für weiteren Transport wird es immer in ganz umgekehrte Lage gebracht und vorher die Öffnung für den Luftzutritt verstopft. Beim Wiederaufrichten muß man dann darauf sehen, daß das Quecksilber im Gefäß sich mit jenem in der Röhre vereinige, ehe man die Höhe erreicht, wo das Quecksilber anfängt, sich in der Röhre zu bewegen; doch ist diese Vorsicht nur bei Heberbarometern oder solchen mit seitlichem Gefäß nötig.

Sollte man, entweder weil an einem sonst wertvollen Barometer die Röhre gebrochen ist, oder aus irgend einem anderen Grunde in den Fall kommen, eine

[1]) Doppelgefäßbarometer, zu beziehen von Müller-Uri, Braunschweig, zu 66 Mk.

Barometerröhre auskochen zu müssen, so wähle man eine solche, welche nur mäßig starke Wände hat, und reinige sie vor dem Zuschmelzen sehr gut. Man erhitze sodann die erforderliche Menge Quecksilber in einer Porzellanschale bis zum Kochen, erwärme auch die Röhre ihrer ganzen Länge nach und fülle etwa 5 cm noch heißes Quecksilber durch einen Papiertrichter in dieselbe. Der gefüllte Teil der Röhre wird nun von unten an unter fleißigem Umdrehen über der Weingeistlampe erhitzt, bis das Quecksilber darin kocht; man hält dabei die Röhre ziemlich wagerecht und stellt die Lampe auf einen flachen, etwas großen Porzellanteller, um bei möglichem Zerspringen der Röhre kein Quecksilber zu verlieren. Übrigens ist bei vorsichtigem Erhitzen diese Gefahr nicht groß. Man erwärmt nun die Röhre wieder der ganzen Länge nach, füllt eine neue, gleich große Portion heißes Quecksilber ein und fängt mit dem Auskochen etwas unterhalb der Stelle an, wo man vorhin aufgehört hat. Auf diese Weise fährt man fort, bis die Röhre auf etwa 1 cm gefüllt ist; den Rest der Röhre füllt man nur mit heißem Quecksilber an. Man kann allerdings nach Treviranus auch ganz gefüllte Barometerröhren in vertikaler Lage mittels einer Weingeistlampe mit hohlem Docht auskochen, indem man das Barometer durch die Lampe steckt und mit dem Auskochen am offenen Ende beginnt; aber man bedarf dazu besonderer Stative, die man für eine so seltene Arbeit nicht gern anschafft.

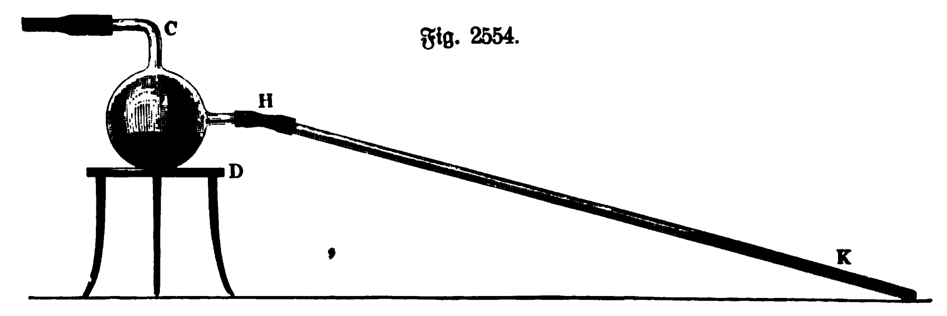


Fig. 2554.

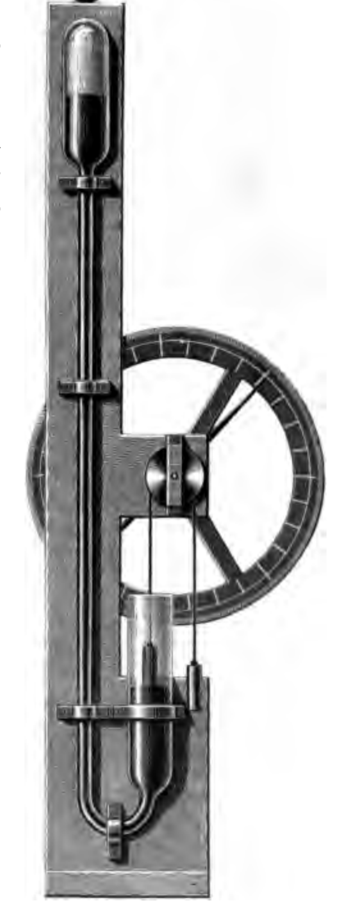
Eine bessere Art, Barometerröhren zu füllen, hat Wild angegeben. Er verbindet einen doppelt tubulierten Ballon bei *C* (Fig. 2554) unter Zwischenschiebung einer Chlorcalciumröhre mit der Luftpumpe und bei *H* mit der Barometerröhre; in den Ballon kommt das gereinigte Quecksilber in mehr als hinreichender Menge; der Apparat wird wiederholt ausgepumpt und wieder mit trockener Luft gefüllt, um denselben auszutrocknen. Das Quecksilber im Ballon wird, wenn der Apparat wieder ausgepumpt ist, zum Kochen erhitzt und dann auch die Röhre, worauf man durch Neigen des Ballons die Röhre langsam füllt und den Apparat bis zum Erkalten stehen läßt.

Macaluso (1880) hat diese Methode etwas abgeändert. Das Gefäß *C* wird durch ein T-förmiges Glasrohr ersetzt, von dessen drei Armen zwei den Tubuli *C* und *H* entsprechen, während der dritte etwa 80 cm lange vertikal abwärts gerichtet ist und in ein enges cylindrisches Gefäß mit Quecksilber eintaucht. Pumpt man aus, so steigt in diesem Arme das Quecksilber auf Barometerhöhe. Gießt man etwas Quecksilber in das Gefäß nach, so steigt entsprechend die Quecksilbersäule in der Röhre, bis sie schließlich an dem Verzweigungspunkte anlangt. Gießt man nun abermals eine kleine Quantität Quecksilber nach, so fließt eine entsprechende Menge in das zu füllende Barometer über. Man läßt diese etwas kochen, bewirkt dann das Überfließen einer neuen Quantität, kocht wieder aus u. s. w.

Waldo (1884) empfiehlt, das zu füllende Barometer an Stelle des Ausflußrohres bei einem Quecksilberdestillierapparat zu bringen, so daß das Quecksilber direkt da hinein destilliert und man somit sicher sein kann, ganz reines Quecksilber zu haben.

Um nun das gefüllte Rohr in das enghalsige Gefäß einbringen zu können, bindet man um den Hals des Gefäßes eine mittels Kleister zusammengepappte, unten abgeschnittene Papierdüte als Trichter, und füllt das Gefäß nebst einem Teile der Düte mit gereinigtem Quecksilber, worauf man die übervolle Röhre mit dem Finger verschließt, sie in die Düte umkehrt, öffnet und in das Gefäß steckt. Nach Entfernung der Düte gießt man auch aus dem Gefäße das überflüssige Quecksilber aus und läßt nur so viel zurück, daß dasselbe bis an den Nullpunkt der etwa schon vorhandenen Skala reicht, wenn das Gefäß an seinem Platze ist. In dem Halse des Gefäßes kann man die Röhre durch Korkstücke feststecken, oder durch einen vorher an die Röhre gesteckten ganzen Kork; doch muß letzterer seitlich einen Einschnitt haben, um der Luft Zutritt zu lassen.

Fig. 2556.



Ein sehr primitives und billiges Barometer, das freilich kaum den Namen eines solchen verdient, kann man sich mit geringer Mühe dadurch verschaffen, daß man eine enge Glasröhre von 1 m Länge nahezu ganz mit Quecksilber füllt, während man das untere Ende mit dem Finger verschließt, das obere Ende etwas erwärmt, Siegellack eintröpfelt, erkalten läßt, bis der Siegellackpfropf fest geworden ist und nun in ein kleines Gefäß mit Quecksilber einstellt [1]).

Fig. 2555.



234. Index- und Radbarometer. Bei dem Indexbarometer (Fig. 2555 E, 18), auch **Variationsbarometer** genannt, befindet sich über dem Quecksilber im äußern Gefäß gefärbtes Petroleum in engem Rohr, dessen Kuppe sich natürlich außerordentlich stark verschiebt, wenn sich der Quecksilberstand auch nur wenig ändert. Man kann das gleiche Prinzip, statt beim offenen, beim geschlossenen Schenkel in Anwendung bringen, wenn man nach **Bartrum** (1895) als leichte Flüssigkeit salycilsaures Methyl benutzt [2]).

---

[1]) Über ein **Glycerinbarometer** siehe Violle, Lehrb. d. Physik, Berlin 1892, Springer, Bd. I, S. 770. — [2]) Auch das bei den Ölluftpumpen benutzte Öl könnte Verwendung finden.

Da die gewöhnlichen Radbarometer in der Regel sich zur Demonstration nicht eignen, so kann man ein solches einrichten, wie Fig. 2556 zeigt, wo der Kreis durch drei Blechstreifen an einem Arm des Brettchens befestigt ist und die Teilung sich auch auf der Rückseite befindet. Aus der Größe der Rolle und des Kreises wird man leicht die Größe eines halben Centimeters auf letzterem ableiten, welche dann für die Barometeränderung als 1 cm auf der Skale des Kreises aufgetragen wird. Der Faden wird einmal ganz um die Rolle geschlungen.

Fig. 2557.



Fig. 2557 (K, 275) zeigt ein selbst registrierendes Barometer mit Hebelmechanismus.

235. Das Wagebarometer von Parny, Morland (1680) u. a. konstruiert und namentlich als selbst-registrierender Apparat (Secchis Barograph 1858) vielfach verwendet, erscheint ebenfalls einer Besprechung wert, da das Prinzip ein recht sinnreiches ist. Ducrue (1885) empfiehlt als Demonstrationsapparat ein einfaches Barometer, hergestellt aus einer am geschlossenen Ende auf etwa 16 mm erweiterten, am offenen auf ungefähr 5 mm verengten, etwa 85 cm langen Glasröhre, mit Quecksilber gefüllt, am offenen Ende mit einer 20 cm langen Kautschukhülse verschlossen und wie bei Ausführung des Torricellischen Grundversuchs in ein 21 cm hohes, 4 cm weites, mit Quecksilber gefülltes Gefäß gestürzt und durch Abstreifen der Hülse unter dem Niveau des Quecksilbers geöffnet. Dieses Barometer wird durch eine Drahtschlinge am einen Ende eines Wagebalkens aufgehängt und tariert. Um Steigen und Fallen des Quecksilbers zu bewirken, bringt man etwas Weingeist in das Rohr und erhöht nach Herstellung des Gleichgewichts die Spannkraft der Alkoholdämpfe durch eine angenäherte Flamme.

236. Luftdruck- und Schweremessung. Die Größe des Luftdrucks ergibt sich aus dem Barometerstande in kg pro qcm, indem man das Gewicht der Quecksilbersäule bei 1 qcm Querschnitt berechnet. Am Ufer des Meeres beträgt die mittlere Barometerhöhe 76 cm. Eine Quecksilbersäule von dieser Höhe und von 1 qcm Grundfläche hat einen Kubikinhalt von 76 ccm. Da nun 1 ccm Quecksilber 13,59 g wiegt, so ist der Druck dieser Säule auf ihre Basis 76 × 13,59 g = 1,033 kg. Bei einem Barometerstande von 76 cm drückt also die atmosphärische Luftsäule auf ein Flächenstück von 1 qcm Inhalt mit einem Gewichte von 1,033 kg oder auf 1 qm mit einem Gewichte von 10 330 kg (vergl. § 138, S. 807).

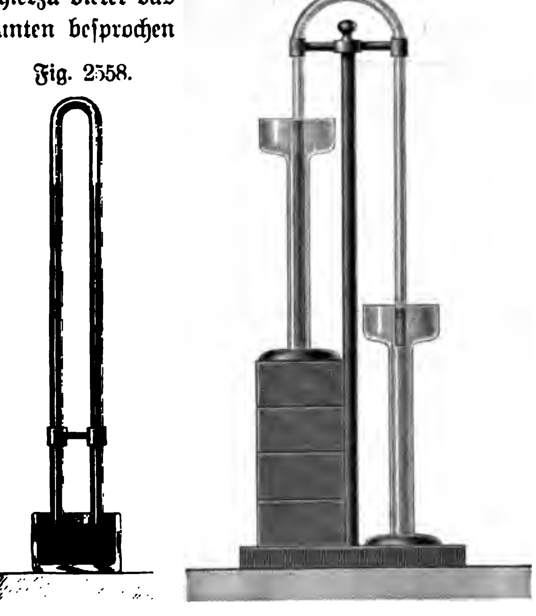
Dieser Druck (1,033 kg auf jedes Quadratcentimeter oder 10 330 kg auf jedes

Quadratmeter) wird (technisch) als Atmosphärendruck oder als Druck einer **Atmosphäre bezeichnet.** Ein Megabar, d. h. der Druck einer Megadyne pro qcm beträgt 98,795 Proz. der Atmosphäre (nach Richards u. Stull, Beibl. 28, 952, 1904).

Pro Meter Höhenzunahme beträgt die Zunahme des Luftdruckes etwa 0,1 mm Quecksilber. In einer Höhe von 5600 m über dem Meeresspiegel ist die Barometerhöhe kaum halb so groß als am Ufer des Meeres. Hieraus ist zu schließen, daß die Luft nicht den ganzen Weltraum erfüllt, sondern nur bis zu verhältnismäßig geringer Höhe (gleiche Dichte angenommen etwa = 8000 m) über dem Erdboden reicht, eine Art Luftmeer bildend, dessen Gesamtgewicht sich zu etwa 520 000 000 000 000 000 kg berechnet.

Ferner gründet sich darauf die Anwendung des Barometers zu Höhenmessungen. Wenn man gleichzeitig am Fuße eines Berges und auf dem Gipfel desselben den Barometerstand mißt, so kann man aus dem Verhältnis der beiden Barometerstände auf den Höhenunterschied der beiden Stationen schließen.

Bei der Umrechnung in absolutes Maß tritt die Fallbeschleunigung hinzu. Ist diese = 9,81, so wird der Atmosphärendruck = 1,0333 . 981 000 = 101 366 Dynen pro qcm (Bar). Man könnte also im Prinzip auch die Fallbeschleunigung durch Beobachtung des Barometerstandes finden, wenn man in der Lage wäre, den Druck auch mit einer Federwage zu messen. Ein Mittel hierzu bietet das Aneroidbarometer, welches weiter unten besprochen wird. (Reduktion des Barometerstandes auf Meereshöhe und mittlere geographische Breite.)


Fig. 2558. Fig. 2559.

237. Das Doppelbarometer. Bezüglich der Erklärung der Hebererscheinungen herrscht in älteren Lehrbüchern einige Verwirrung hinsichtlich dessen, was unter den „Schenkeln" eines Hebers zu verstehen sei. Analog wie man beim gebogenen Hebel als Hebelarm die Vertikalabstände der Kräfte vom Drehpunkte bezeichnet, so dürfte es hier am zweckmäßigsten sein, die vertikalen Abstände des höchsten Punktes von den beiden Flüssigkeitsniveaus als Schenkel des Hebers zu bezeichnen, da alsdann kein Zweifel mehr darüber sein kann, daß Gleichgewicht vorhanden ist, sobald die beiden Schenkel gleich lang sind, dagegen Strömung nach der Seite des längeren Schenkels stattfindet, sobald dies nicht der Fall ist. Ferner wird zu wenig Gewicht darauf gelegt, daß der Heber nur fließen kann, wenn der Luftdruck ausreicht, die beiden Schenkel gefüllt zu erhalten, so daß man (wie Emsmann (1885) bemerkt) selbst in verbreiteten und im übrigen sehr guten Büchern die Bemerkung findet, daß es mit Hülfe des Hebers mög-

lich sei, Wasser über die größten Höhen zu leiten [1]). Aus diesem Grunde dürfte es wohl zweckmäßig sein, zwischen der Betrachtung des Hebers und des Barometers einen Übergang herzustellen durch Demonstration des Doppelbarometers, und denselben in den beiden in Fig. 2558 und 2559 dargestellten Formen vorzuführen. Die erste Form zeigt sofort, daß das Doppelbarometer im wesentlichen ein gewöhnliches Barometer ist, und durch Neigen der Röhre oder Heben und Senken des Gefäßes kann man demonstrieren, wie die Flüssigkeitssäulen zusammentreffen und ein Ganzes bilden, sobald die Schenkel kürzer sind als der Barometerstand, dagegen sich trennen, wenn länger. In der zweiten Form kann man zeigen, welche Wirkung ausgeübt wird, wenn man nur das eine oder andere Gefäß hebt, und zwar:

a) wenn die Schenkel länger als der Barometerstand (d. h. beide Gefäße tief gestellt sind);

b) wenn die Schenkel kürzer als der Barometerstand sind (d. h. beide Gefäße hoch stehen, wobei dann jeweils Strömung aus dem höherstehenden in das tieferstehende eintritt, bis Gleichgewicht erreicht ist). Zweckmäßig wird dabei das eine Gefäß mit gefärbtem Wasser gefüllt.

Kleiber (Z. 14, 346, 1901) variiert den Versuch in der Art, daß er die beiden Gefäße mit verschiedenen Flüssigkeiten, z. B. Wasser und Petroleum, füllt. Er empfiehlt ferner ein Doppelbarometer von der Form Fig. 2560, bei welchem sich nach Öffnung des Hahnes x nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren die oberen Niveaus a und b auf gleiche Höhe einstellen.

Fig. 2561 (E, 36) zeigt einen Heberapparat nach E. W. G. Schulze, der ebenfalls dazu dienen kann, die Abhängigkeit der Heberwirkung vom Luftdruck zu demonstrieren.

Fig. 2561.

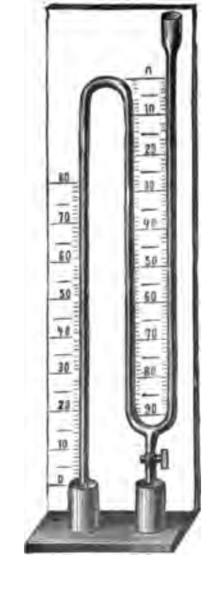


Fig. 2560.

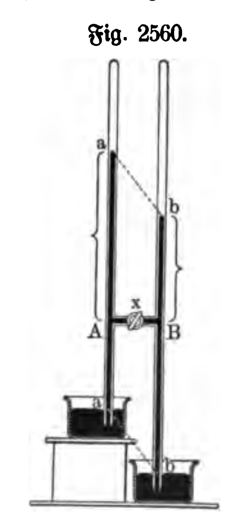


Fig. 2562.



238. Der Heber. Einen einfachen Heber (Fig. 2562) biegt man sich aus einer Glasröhre von mehr als 5 mm Durchmesser. Man füllt ihn durch den längeren Schenkel, indem man den kürzeren mit dem Daumen verschließt, und kehrt ihn dann in das zu entleerende Gefäß um, wenn man ihn nicht etwa

[1]) Falls keine Luftblase auftritt, ist dies allerdings möglich, soweit die Kohäsion des Wassers zureicht, worauf Weinhold aufmerksam macht.

durch Saugen an der freien Öffnung in Gang setzen will. Zweckmäßig wird man zeigen: 1) einen rechtwinklig gebogenen; 2) einen spitzwinkligen; 3) einen, dessen kurzer Schenkel aus einer spiralig gewundenen Glasröhre besteht, die länger ist als der gerade lange Schenkel; 4) die Benutzung eines einfachen Kautschukschlauchs als Heber.

Einen Heber mit Saugrohr, wie Fig. 2563, sollte man jedenfalls auch haben, um dessen Gebrauch zu erläutern; er wird beim Ansaugen bei *b'* mit dem

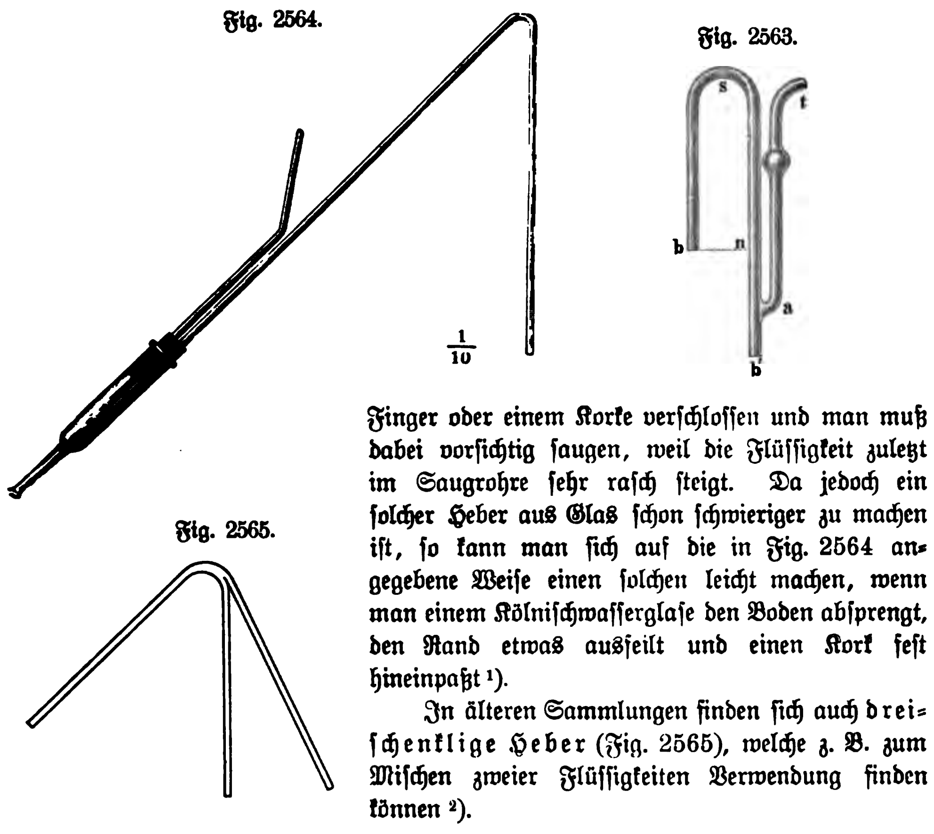


Fig. 2564. Fig. 2563. Fig. 2565.

Finger oder einem Korke verschlossen und man muß dabei vorsichtig saugen, weil die Flüssigkeit zuletzt im Saugrohre sehr rasch steigt. Da jedoch ein solcher Heber aus Glas schon schwieriger zu machen ist, so kann man sich auf die in Fig. 2564 angegebene Weise einen solchen leicht machen, wenn man einem Kölnischwasserglase den Boden absprengt, den Rand etwas ausfeilt und einen Kork fest hineinpaßt [1].

In älteren Sammlungen finden sich auch **dreischenklige Heber** (Fig. 2565), welche z. B. zum Mischen zweier Flüssigkeiten Verwendung finden können [2].

239. Kapillarheber. Verfertigt man einen Heber aus einer Kapillarröhre und wendet denselben derart an, daß der kurze Schenkel kleiner wird als die kapillare Steighöhe, so beginnt der Heber von selbst zu fließen, man hat nicht nötig, ihn zuvor mit Wasser zu füllen oder anzusaugen, da die Kapillarkraft dies besorgt. Zweckmäßig hängt man eine ganze Reihe solcher Kapillarheber nebeneinander, um die ausströmende Flüssigkeitsmenge einigermaßen ansehnlich zu machen. Von Kapillarröhren kann man dann übergehen zu faserigen Stoffen, wie Bündel aus Fäden, Dochte, Gewebe, Fließpapier oder Röhren, welche mit feinem Sand oder wasserdurchlässiger Erde ausgestopft sind.

---

[1] Über einen nach ähnlichem Prinzip wirkenden Heber, bei welchem zunächst eine an den längeren Schenkel angeblasene Kugel gefüllt wird, siehe P. Steglitz, Chemiker-Zeitung 16, 504. — [2] Zu erwähnen wäre eventuell auch die Wirkung eines mit Wasser gefüllten Hebers beim Einsetzen in ein Gefäß mit Quecksilber oder die eines **wellenförmigen mit verschiedenen** Flüssigkeiten gefüllten Hebers.

Verfertigt man einen spitzwinkligen Heber, dessen langer Schenkel gebildet wird aus einer 3 mm weiten, einige Centimeter langen Glasröhre, während der kürzere kapillar derart ausgezogen ist, daß er sich in ein Rohr von 1,5 mm Durchmesser gerade einschieben läßt, stellt dann eine solche Glasröhre von 1,5 mm und 8 bis 9 cm Länge schief in ein Gefäß mit Wasser, so daß das Wasser kapillar in derselben aufsteigt, schiebt alsdann den zuvor mit Wasser gefüllten Heber ein, so daß der kurze Schenkel in das Wasser in der schiefstehenden Glasröhre eintaucht, so sollte man denken, daß nun der Heber fließen würde. Tatsächlich aber entleert er sich, da durch die Oberflächenspannung das Wasser in dem vertikal herabhängenden Rohre (von 3 mm Durchmesser) aufwärts gezogen wird. (Plateau.)

Der Tantalusbecher, Fig. 2566. Der Heber dient dabei als Handhabe und mündet bei *a* am Boden des Bechers, während die andere Öffnung *l* mit dem Fuße desselben gleich steht. Wenn man einen gläsernen Becher hat, in dessen Boden eine Öffnung ist, so kann man mittels Kork in denselben, wie in Fig. 2567, einen gekrümmten Heber befestigen, oder, wie in Fig. 2568, nur eine gerade Röhre und über diese eine weitere oben verschlossene Röhre stülpen, die etwas länger ist als die innere, jedenfalls aber noch etwa 5 mm niedriger als der Becher. Hierzu können Medizingläser, deren Boden abgesprengt wird, verwendet werden, wenn man den Hals in einen hölzernen Fuß kittet. In allen diesen Fällen fängt der Heber von selbst an zu fließen, wenn man das Gefäß bis über den Heber mit Flüssigkeit füllt.

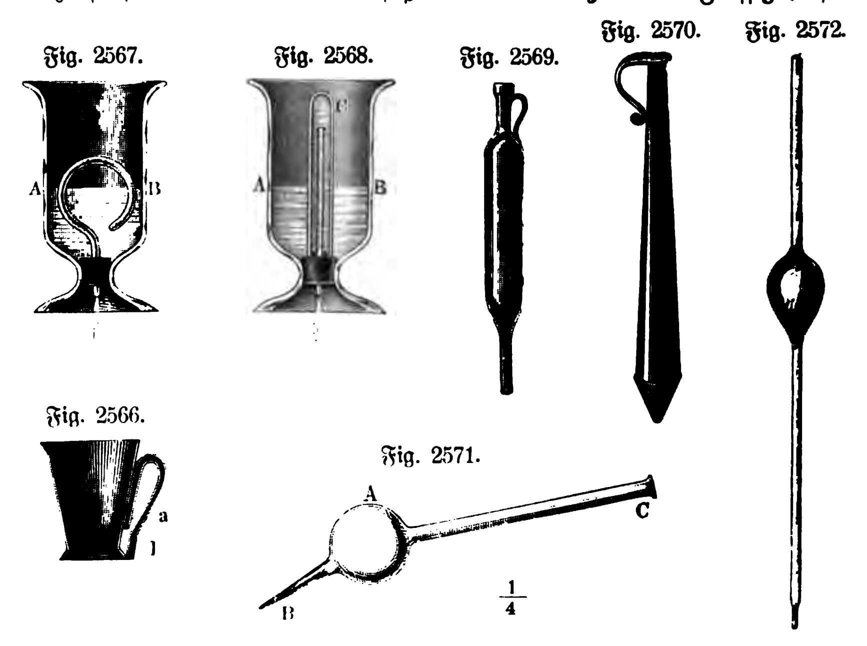


Fig. 2567. Fig. 2568. Fig. 2569. Fig. 2570. Fig. 2572. Fig. 2566. Fig. 2571.

240. Der Stechheber ist eine gläserne oder blecherne, etwa 3 bis 5 cm weite Röhre, Fig. 2569 u. 2570, welche einerseits in ein engeres, oben ebenes, mit dem Daumen verschließbares Stück, anderseits in eine ziemlich feine Spitze ausläuft, deren Öffnung noch weniger als 3 mm Durchmesser hat. Sein Gebrauch ist bekannt.

Sehr oft bedient man sich kleinerer Instrumente der Art unter dem Namen Pipette, um Flüssigkeiten aus einem Gefäß aufzusaugen, wenn man nur wenig daraus entfernen will, oder um kleine Portionen Flüssigkeit irgendwo zuzusetzen,

zu welchem Zwecke namentlich geeichte Pipetten (vergl. S. 779) Anwendung finden. Man kann nämlich die in der Kugel *A*, Fig. 2571, enthaltene Flüssigkeit tropfenweise aus der feinen Spitze *B* ausfließen lassen, wenn man den Daumen auf der Öffnung *C* ein wenig lüftet. Eine andere Form zeigt Fig. 2572 (K, 0,80).

Die einfachste Art, sich eine Pipette zu verschaffen, besteht darin, daß man eine etwa 5 bis 10 mm weite Glasröhre an dem einen Ende in eine Spitze auszieht und am anderen Ende die Öffnung durch Glühen sich etwas verengern läßt, um sie bequem mit dem Zeigefinger schließen zu können. Die Röhre selbst wird etwa 15 bis 20 cm lang genommen und die ausgezogene Spitze 4 cm.

Für viele Zwecke ist es bequem, auf die obere Öffnung einen etwas starken Gummiballon zu binden. Zum Füllen drückt man den Ballon zusammen und steckt die Spitze in die Flüssigkeit; läßt man mit dem Drucke nach, so füllt sich die Pipette und man kann durch Druck auf den Ballon wieder beliebige Mengen ausfließen lassen. Ein Schlauchstück mit Stöpsel statt des Ballons genügt ebenfalls.

Auf das gleiche Prinzip, wie der Stechheber, gründen sich eine große Zahl verschiedener Spielereien.

Der **Zaubertrichter**, Fig. 2573, besteht aus zwei Trichtern ineinander, welche zwischen sich einen Raum übrig lassen, in den die ganz schmale kreisrunde Öffnung

Fig. 2573.



Fig. 2574.



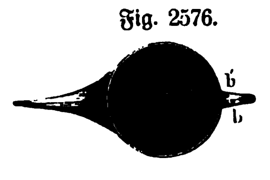
Fig. 2577.

Fig. 2575.



bei *a* führt; diese Öffnung wird gebildet von den Spitzen der beiden Trichter, die am oberen Rande luftdicht miteinander verlötet sind. Die Handhabe ist zum Teil hohl und steht oberhalb mit der inneren Höhlung in Verbindung; sie hat bei *b* eine kleine Öffnung. Man füllt den Trichter, indem man die Spitze bei *c* verschließt, die Flüssigkeit dringt nun auch in den Zwischenraum; hält man aber die Öffnung bei *b* zu, so fließt die Flüssigkeit aus dem Zwischenraume nicht ab, und man kann sie erst nachher durch zeitweises Lüften des Fingers über *b* in beliebigen Portionen abfließen lassen.

Fig. 2576.



Der **Ölkrug der Witwe**, Fig. 2574, erklärt sich danach von selbst.

Die **Zauberkanne**, Fig. 2575 und 2576, hat ebenfalls bei *b* in der Handhabe eine Öffnung, sie wird aber, nachdem man den nur angesteckten Boden *m* weggenommen, durch eine im Boden *n* befindliche, mit einer Schraube verschließbare Öffnung gefüllt. Die Ausgußöffnung darf natürlich nur enge sein.

Wird eine solche Kanne, wie Fig. 2576 im Grundrisse zeigt, durch eine Scheidewand getrennt, so kann man zweierlei Flüssigkeiten durch die Bodenöffnungen *a a'* einfüllen und, je nachdem man die Öffnung *b* oder *b'* in der Handhabe lüftet, die eine oder die andere einfließen lassen.

Das **Sieb der Vestalin**, Fig. 2577, ist ein Gefäß von Blech, dessen Boden aus einem feinen Siebe besteht. Flüssigkeiten halten in demselben, solange der Hals durch den Pfropfen verschlossen bleibt.

241. Der intermittierende Brunnen. Ganz einfach erhält man denselben, wenn man an ein Gefäß von Glas *A*, Fig. 2578, eine Fassung *BC* von Blech machen läßt, durch welche das beiderseits offene Rohr *D* geht, das unterhalb einen kleinen Ausschnitt *e* hat; außerdem hat die Fassung noch die kleinen Röhrchen *a*, *b*. Ein zweites blechernes Gefäß *E* bildet oberhalb ein Becken und trägt in der Mitte die Röhre *G*, welche am Boden des Beckens auch eine Öffnung hat und auf die

Fig. 2578. Fig. 2580. Fig. 2581.

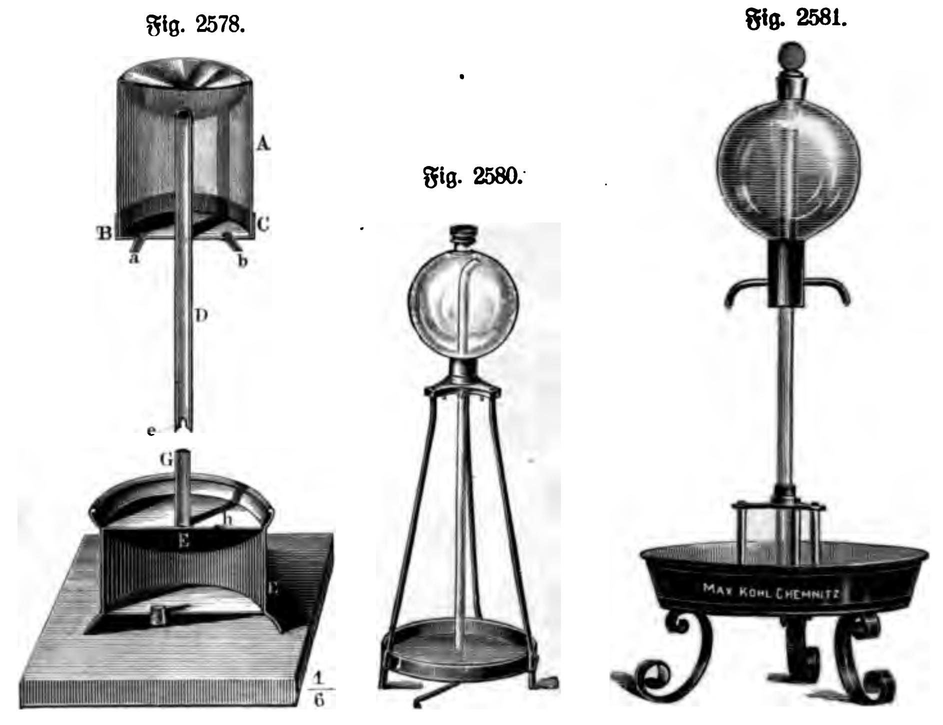
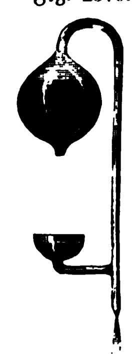


Fig. 2579.



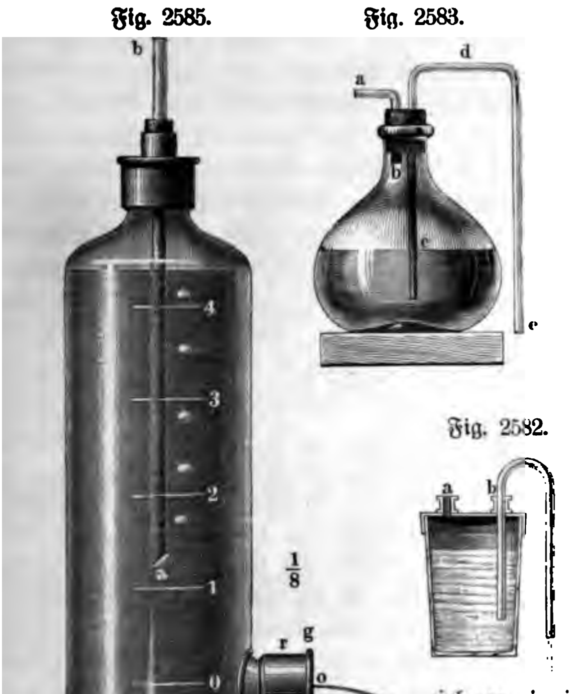
die Röhre *D* gesteckt wird, nachdem *A* durch sie mit Wasser gefüllt ist. Die kleine Öffnung *h*, welche vom Boden des Beckens in das Gefäß *E* führt, läßt weniger Wasser in *E* ablaufen, als *a* und *b* zuführen. Im Boden des Gefäßes *E* ist eine durch Kork verschlossene Öffnung, um dasselbe entleeren zu können. Sobald das Gefäß *A* auf die Röhre *G* gesteckt ist, fließt das Wasser aus *a*, *b* und sammelt sich in dem Becken, weil *h* kleiner ist als *a* und *b* zusammen; dadurch wird aber die Öffnung der Röhre *D* verschlossen, es kann keine Luft mehr durch *D* in *A* gelangen und die Röhrchen *a*, *b* hören so lange zu fließen auf, bis durch den andauernden Abfluß bei *h* die Öffnung von *D* wieder frei wird. Daß man diesen Zeitpunkt abwartet und dann dem Brunnen wieder zu fließen befiehlt, ist nur beim Taschenspieler üblich, wo aber das Ganze maskiert wird.

Einfacher und billiger sind die ganz aus Glas gefertigten Apparate (Fig. 2579 Lb, 3), bestehend aus einer unten offenen Kugel, an deren höchstem Punkte ein sich abwärts wendendes offenes Rohr anschließt, welches an einem seitlichen Zweigrohr einen Trichter trägt, in welchen das aus der unteren Öffnung der Kugel austretende Wasser einfließt. Andere Formen zeigen Fig. 2580 (Lb, 20) und 2581 (K, 33).

Läßt man sich vom Klempner auf ein Trinkglas, Fig. 2582, einen Deckel mit zwei Röhrchen von einigen Millimetern Weite machen und diesen auf das Glas luftdicht aufkitten, kittet sodann in das eine Blechröhrchen *b* eine heberförmig gebogene Glasröhre, füllt durch das andere Blechröhrchen *a* Wasser ein und saugt nun den Heber an, so fließt er so lange, als *a* offen ist; hält man aber *a* mit dem Finger zu, so kommt er bald zum Stillstehen. Man kann übrigens die Einrichtung auch so treffen, daß man durch den Pfropfen eines Gefäßes *b*, wie in Fig. 2583, zwei Röhren führt, wovon *ab* zum Lufteinlassen und *cde* als Heber dient. Fig. 2584 zeigt eine Anwendung hiervon auf das Filtrieren einer Flüssigkeit oder das Auswaschen eines Niederschlages.

An einer Flasche, welche entweder Wasser oder die zu filtrierende Flüssigkeit enthält, ist ein Heber *aa* angebracht, welcher die Flüssigkeit in den Trichter leitet; er kann aber nur so lange fließen, als eine zweite nur durch den Pfropf reichende Röhre *bb* mit ihrem unteren Ende nicht von der Flüssigkeit im Trichter bedeckt ist und infolgedessen in *bb* eine Flüssigkeitssäule aufgesaugt ist, welche der wirksamen Druckhöhe des Hebers das Gleichgewicht hält. Diese Röhre muß aber sehr weit sein, falls auf solche Weise gleichmäßige Regulierung des Ausflusses erzielt werden

Fig. 2585. Fig. 2583. Fig. 2584.



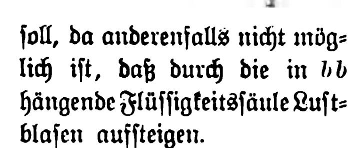


Fig. 2582.

soll, da anderenfalls nicht möglich ist, daß durch die in *bb* hängende Flüssigkeitssäule Luftblasen aufsteigen.

242. Das Mariottesche Gefäß. Ein derartiges Gefäß ist schon in theoretischer Beziehung ein interessanter Apparat, den man sich übrigens leicht verschaffen kann (Fig. 2585 Lb, 30). Man versieht nämlich ein etwas starkes Glasgefäß mit einem gut schließenden reinen Korkpfropf oder besser Kautschukstöpsel, der mit einer Öffnung versehen wird, welche etwas kleiner ist als die einzusetzende beiderseits offene Glasröhre. Diese wird von einer Barometerröhre abgenommen und an der Lampe unterhalb etwas ausgezogen, worauf man sie so heiß in die Öffnung des Korkes eindreht, als möglich ist, ohne denselben anzubrennen, man erhält so einen guten Schluß. Hat

man keine tubulierte Flasche, wie in der Figur, so bohrt man mit einem kupfernen Ringe auf der Drehbank eine Öffnung von ungefähr 1 cm Durchmesser in das Gefäß und läßt an eine Blechröhre von etwas größerer Weite einen Rand löten, der gerade auf die Flasche paßt und mit Siegellack aufgekittet wird. In diesen Tubulus steckt man durch einen zweiten kurzen Kork eine kurze gläserne Ausflußröhre und verbindet sie durch einen Schlauch mit einem zweiten tubulierten Gefäß, oder falls man ein solches nicht besitzt, mit einem Heber, der in einen Standcylinder eingesetzt ist. Der Wasserstand, der sich hier herstellt, ist abhängig von der Stellung der offenen Röhre im ersten Gefäß und entspricht der Höhe ihrer unteren Öffnung.

Als Beispiel der technischen Anwendung kann eine Öl- oder Petroleumlampe mit Sturzflasche gezeigt werden.

243. **Die Luftpumpe.** Wenn bei Anschaffung derselben, wie es aber leider öfters der Fall ist, die Geldverhältnisse nicht gänzlich hindernd entgegentreten, so schaffe man sich gleich ein gutes Instrument aus bewährter Werkstätte an; die Luftpumpe ist für den Unterricht ebensowohl, wie für wissenschaftliche Forschung, eines der wichtigsten Instrumente, und man würde sich nur zu bald zur Anschaffung eines besseren Instrumentes veranlaßt finden, was dann häufig nicht mehr möglich ist[1].

Immerhin muß sich der Lehrer in erster Linie durch pädagogische Erwägungen leiten lassen, nicht durch Bedürfnisse hinsichtlich der Ausführung wissenschaftlicher Untersuchungen im Laboratorium, am allerwenigsten durch die Reklamen von Mechanikern. Eine solche angepriesene oder gar patentierte Luftpumpe kann vorzüglich sein für technische Zwecke, z. B. Glühlampenfabrikation, Herstellung von Röntgenröhren u. s. w., es erscheint auch vollkommen gerechtfertigt, daß der Erfinder den Schutz des Patentgesetzes genießt und die Gebraucher seines Apparates gewissermaßen besteuert; aus der Tatsache, daß die Pumpe patentiert ist und in technischen Betrieben angewendet wird, gewissermaßen in „Mode“ gekommen ist, folgt aber keineswegs, daß sie sich auch für den Unterricht eignet. Hier ist vor allem durchsichtige, einfache Konstruktion erforderlich, entweder in der Art, daß die Pumpe mit Glasstiefeln versehen ist, so daß das Innere ohne weiteres beobachtet werden kann oder, falls sie ganz aus Metall besteht, daß sie sich leicht zerlegen läßt oder daß die Hauptteile der Einrichtung schon äußerlich leicht erkennbar sind.

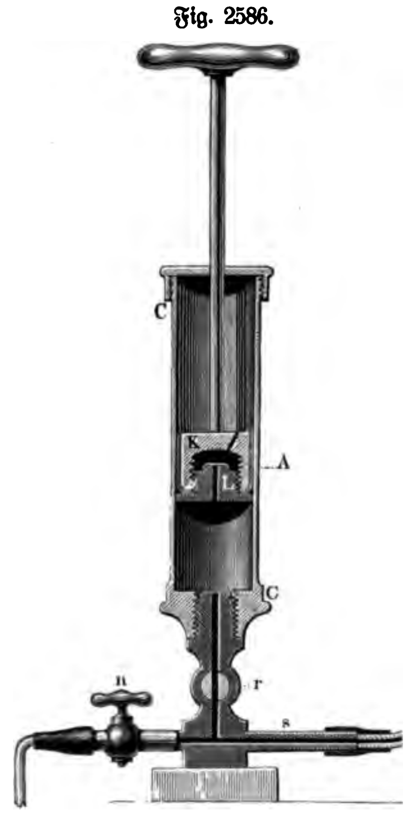
Wesentlich ist ferner, daß zum Betriebe bei Ausführung der gewöhnlichen Schulversuche Mittel ausreichen, welche überall leicht zu erhalten sind, daß nicht etwa größere Mengen eines Spezialöles erforderlich sind, dessen Zusammensetzung Fabrikgeheimnis ist, ohne welches aber die Pumpe nicht ordentlich wirken kann, und dessen Verunreinigung ebenfalls die gute Wirkung vereitelt. In der Regel wird im gegebenen Moment kein Ersatz vorhanden oder zu beschaffen sein oder man findet keine Zeit die Pumpe auseinander zu nehmen, zu reinigen und mit frischem Öl zu füllen und damit sind diejenigen Versuche, für deren Ausführung die Pumpe besondere Vorzüge besitzt, überhaupt gestört, wenigstens nicht besser auszuführen, als mit einer gewöhnlichen Pumpe ohne Spezialöl.

Sehr wichtig ist ferner, daß die Pumpe rasch zu arbeiten gestattet, da die Zeit im Unterricht sehr beschränkt ist. Die Pumpe muß also leicht gehen, was namentlich bei gewissen Öllustpumpen zutrifft, bei welchen der Zutritt der Luft

[1]) Siehe auch Bd. I (1), S. 131 u. 135 (Schieberluftpumpe, Vakuumleitung).

aus dem Rezipienten nicht durch Hähne mit enger Bohrung erschwert ist, wodurch rasche Kolbenbewegung, also Anwendung enger Stiefel mit geringer Kolbenreibung ermöglicht wird, auch ist hier nicht wie bei gewöhnlichen Hahnluftpumpen fortwährendes Umstellen von Hähnen erforderlich. Eine langsam arbeitende Pumpe ist für die gewöhnlichen Versuche nicht zu gebrauchen, wenn sie auch im stande wäre ein Vakuum zu erzielen, wie es eine Quecksilberluftpumpe erzeugt. — Abgesehen von ihrer Zerbrechlichkeit ist aus diesem Grunde auch letztere nicht verwendbar, obschon sie, weil aus Glas bestehend und gewissermaßen einfach eine Abänderung des Barometers, in anderer Hinsicht sich hervorragend für Demonstration eignen würde.

Fig. 2586.

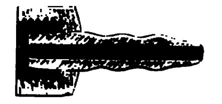


Als ganz besonderer Vorteil der Ölluftpumpen wird hervorgehoben, daß sie jederzeit gebrauchsfertig sind, während andere Kolbenpumpen häufiges Schmieren der Kolben, Hähne u. s. w. erfordern. Eine Ölpumpe, in welche etwa Wasser oder Äther eingedrungen ist, muß natürlich ebenso zerlegt und gereinigt werden wie eine Pumpe ohne Öldichtung.

Mit der Quecksilberpumpe hat endlich die Ölpumpe den Vorzug gemein, daß der schädliche Raum vermieden ist, welcher die Verminderung des Drucks unter 1 bis 3 mm unmöglich macht.

244. Pumpen mit schädlichem Raum. Zur Demonstration des Prinzips dürfte mit Vorteil eine primitive Pumpe, etwa die Schlauchpumpe von Prytz[1]), oder eine einfache Handluftpumpe mit Hähnen oder Ventilen zu gebrauchen sein. Ich pflege hierzu auch eine alte Guerickesche Pumpe mit nach unten gehender mit Steigbügel versehener Kolbenstange zu benutzen.

Fig. 2587.

Getman (Z. 12, 157, 1899) setzt eine primitive Luftpumpe zusammen aus einer Radfahrerpumpe und einem T-Stück mit Bunsenschen Ventilen.

Häufig gebraucht werden Handluftpumpen wie Fig. 2586, welche gewöhnlich zum Aufschrauben auf einen Tisch vorgerichtet sind. Die zu entleerenden Gefäße können mit jedem Arme durch Glasröhren mit Kautschuk verbunden werden; bequem für solche Verbindungen sind Röhren aus vulkanisiertem Kautschuk, die man über eine Drahtspirale gestreift hat. Noch bequemer sind die im Handel zu erhaltenden starkwandigen, innen nur 2 bis 3 mm weiten sogenannten Luftpumpenschläuche.

Es ist für viele Versuche gut, wenn beide Arme mit Hähnen versehen sind und das Ansetzen der Barometerröhre oder der Kautschuk- und Glasröhren durch Zug-

[1]) Zu beziehen von R. Fueß, Steglitz-Berlin. Vergl. S. 787.

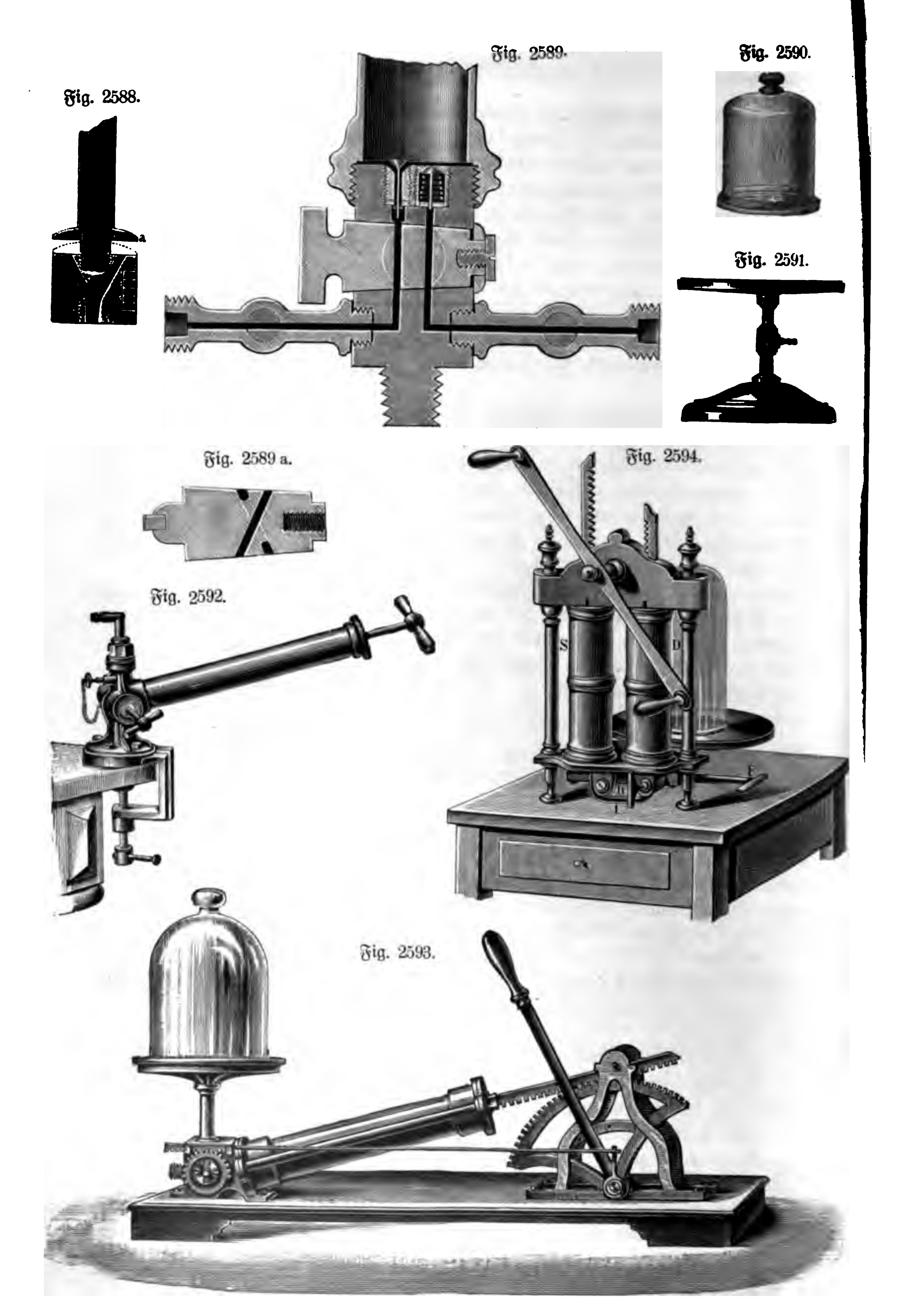


Fig. 2588. Fig. 2589. Fig. 2590. Fig. 2591. Fig. 2589 a. Fig. 2592. Fig. 2594. Fig. 2593.

schrauben, wie Fig. 2587, geschieht. Eine solche Ansatzröhre sollte jede Luftpumpe haben, da man sehr oft in den Fall kommt, Gefäße auspumpen zu sollen, welche man weder auf den Teller setzen noch anschrauben kann; auch wird es manchmal nötig, in zwei Räumen zugleich die Verdünnung vorzunehmen.

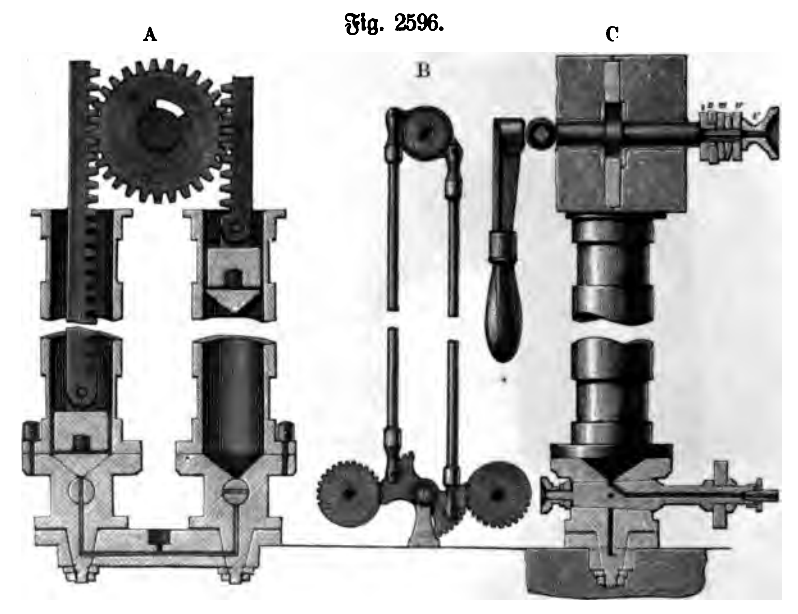

Fig. 2595.

Meistens haben diese Luftpumpen keinen doppelt durchbohrten Hahn, sondern im Kolben und im Boden ein Klappventil, wie *L* in Fig. 2586. Es besteht aus einem über die Öffnung gebundenen Streifen von dünnem vulkanisiertem Kautschuk. Solche Ventile sind leicht zu ersetzen, wenn sie nicht mehr gehörig funktionieren. Auf kleinen Kolben bringt man auch manchmal für das eine Ventil eine Klappe oben auf dem Kolben an, wie in Fig. 2588, wo die Klappe *a* sich an der Kolbenstange bewegt.

Eine solche Pumpe wird sehr vielseitig brauchbar, wenn sie mit dem Hahn von Silbermann, Fig. 2589 und Fig. 2589a, versehen ist; man kann dann damit Gase aus einem Gefäße in ein anderes und wieder zurück führen und es sind die kleinen, in den Armen befindlichen Hähne nicht nötig; sie dienen nur zu besserem Abschluß, wenn man die ausgepumpten Gefäße stehen lassen will. Es ist auch sehr zweckmäßig, eine solche Luftpumpe auf eine hölzerne Schraubzwinge zu schrauben und durch diese an dem Tisch zu befestigen. Der Rezipient, Fig. 2590 (Lb, 1 bis 10) wird auf einen abgesonderten Teller mit Hahn gesetzt, wie Fig. 2591 (Lb, 20 bis 30).

Häufig wird bei neueren Handluftpumpen der Cylinder schräg gestellt, wodurch das Arbeiten mit der Pumpe bequemer gemacht wird (Fig. 2592 E, 48), zugleich ist dann die Pumpe mit einer eisernen Schraubzwinge fest verbunden, so daß man sie mittels derselben leicht an einen Tisch anschrauben kann[1]).

Fig. 2596.



Für die eigentlichen Schulversuche ist eine Handluftpumpe selten genügend, weil die Zeit gewöhnlich knapp zugemessen ist. Für diesen Zweck darf der Stiefel der Luftpumpe nicht zu klein sein, sie muß folglich durch Zahn und Getriebe bewegt werden (Fig. 2593 Lb, 250) und Selbststeuerung haben; noch besser ist eine zweistiefelige Luftpumpe, Fig. 2594 und 2595 (Lb, 400). Diese ist der größeren Dauerhaftigkeit wegen einer doppelt wirkenden, einstiefeligen vorzuziehen. Selbststeuerung ist bei größeren Luftpumpen sehr zu empfehlen[2]).

Schöbl (Pogg. Ann. 84, 544, 1851) suchte den schädlichen Raum der Luftpumpe dadurch zu beseitigen, daß er den Boden des Pumpenstiefels konisch aus-

[1]) Eine einstieflige Hahnluftpumpe mit abwärts gerichteter Kolbenstange, aber getrenntem Teller liefert Prof. Dr. Edelmanns Institut in München (Preis 330 Mk.). Die Luft im schädlichen Raume wird bei derselben selbsttätig verdünnt. — [2]) Für die Demonstration ist es gut, sich ein etwas großes hölzernes Modell eines Senguerdschen Hahnes machen zu lassen, dessen Kern in der Ebene der schiefen Bohrung durchschnitten wird (vgl. Fig. 2596 C).

höhlte, derart, daß die Spitze der Aushöhlung mit dem Ende der Bohrung des Hahnes zusammentraf, und indem er die Unterfläche des Kolbens so gestaltete, daß sie luftdicht in diesen Konus hineinpaßte.

Kleemann, Mechaniker in Halle, konstruierte (1882) eine Luftpumpe nach dem gleichen Grundsatze mit verbesserter Selbststeuerung (Fig. 2596, A — C). Das Triebrad für die Zahnstangen der Kolben ist lose auf der Achse befestigt und wird beim Drehen der letzteren durch eine Nase (Fig. A) mitgenommen. Diese Nase greift in einen Ausschnitt des Zahnrades ein, der so breit ist, daß beim Wechseln der Drehungsrichtung die Achse sich zunächst um 60° dreht, ehe der Trieb mitgenommen wird. Das der Kurbel entgegengesetzte Ende der Achse ist nun zu einem vierkantigen Zapfen gearbeitet, auf welchen die Scheibe I (Fig. C) aufgesteckt ist, auf deren kurzem cylindrischen Ansatz eine zweite Scheibe II drehbar ist, die mittelst der Schraube V und der beiden Schrauben III und IV mit zwischengelegter Feder derart angedrückt wird, daß genügende Reibung entsteht, um durch die Scheibe II die Umsteuerung der Hähne zu bewirken. Diese geschieht nun, wie aus Fig. B zu ersehen ist, dadurch, daß die Scheibe II bei ihrer Drehung um 60° vermittelst zweier Kuppelungsstangen einen gezahnten Doppelsektor von 60° umlegt, der seinerseits Drehung der halbverzahnten Köpfe der Hahnzapfen um 90° veranlaßt. Diese Köpfe sind halb, nicht auf $^1/_4$, des Umfanges verzahnt, um durch Verdrehung derselben um 90° gegen die Bohrung der Hahnzapfen zu bewirken, daß die Luftpumpe komprimierend statt verdünnend wirkt. Wechselt man die Drehrichtung der Kurbel, so bewegt sich zunächst die Scheibe II um 60°, es werden somit die Hähne um 90° umgelegt. Erst dann werden auch die Kolbenstangen mitgenommen und bis in die äußersten Stellungen gebracht. Wechselt man nun wieder die Drehrichtung der Kurbel, so erfolgt zunächst wieder Umsteuerung u. s. w. Die Ausblaseöffnungen der Hähne sind vom Experimentierenden abgewendet, um denselben vor ausspritzendem Öl zu schützen, außerdem sind sie durch kleine Ventile abgesperrt, da sonst der aufgezogene Kolben leicht den anderen in der tiefsten Lage befindlichen etwas hebt, ehe Umsteuerung erfolgt ist, so daß etwas Luft eindringen kann.

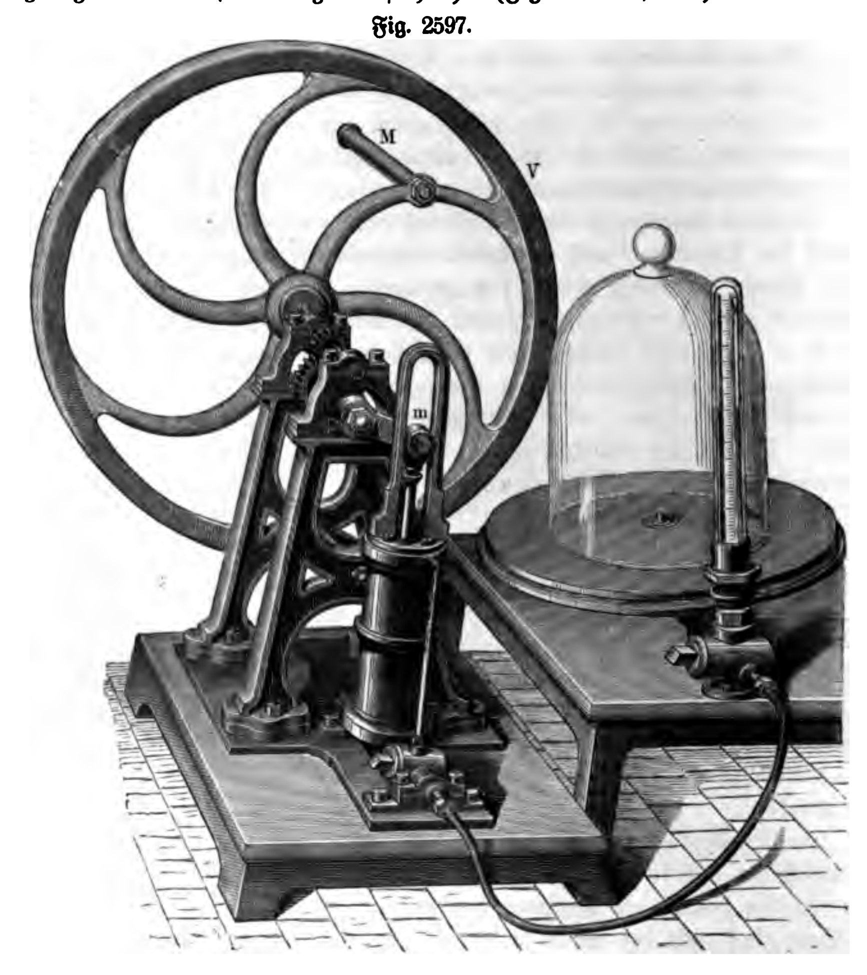
Die Wirkung des schädlichen Raumes wird erheblich vermindert durch den Gebrauch des **Babinethahns**, welcher gestattet die Kanäle so zu verbinden, daß nur der eine Stiefel den Rezipienten auspumpt, aber so, daß die von ihm ausgestoßene Luft nicht den vollen Luftdruck zu überwinden hat, wie bei Fig. 2596 C, sondern in das von dem anderen Stiefel erzeugte Vakuum eintritt, welcher also nur dazu dient, den schädlichen Raum des ersten auszupumpen. Gleiches leistet der **Graßmannsche** Hahn.

Bei größeren gewöhnlichen Luftpumpen geschieht die Bewegung des Kolbens häufig durch Schwungrad, Krummzapfen und Gelenkstange. Sie arbeiten schnell und wären darum für den Unterricht besonders brauchbar, wenn nicht andere Übelstände dieses hinderten. Am meisten Verbreitung hat unter diesen wohl die Pumpe von **Bianchi** (Fig. 2597) mit oscillierendem Cylinder gefunden (W, 460 bis 520, Lb, 600 bis 1100, K, 420, E, 520, eine ähnliche: S, 600, Lb, 500). Eine Pumpe mit zwei oscillierenden Cylindern hat **Benecke** konstruiert (E, 483).

Eine eigene Art Kolben wendet **Deleuil** in Paris seit 1849 an. Sie sind massiv und doppelt so lang, als der Durchmesser des (gläsernen) Stiefels, und haben einen Durchmesser, der um $^1/_{20}$ mm kleiner ist, als jener des Stiefels. Auf

ihrer Oberfläche sind seichte Rinnen eingedreht, welche um 1 cm voneinander abstehen. Die Maschinen sind außerdem doppeltwirkend, mit kontinuierlicher Bewegung, und die Geradführung ist durch ein hypocykloidales Rad bewirkt. Daß eine solche Maschine leicht zu bewegen ist, ist nicht zu bezweifeln, der erreichbare Verdünnungsgrad genügt aber nur für wenige Versuche [1]). (Fig. 2598 K, 660).

Fig. 2597.

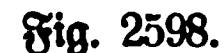


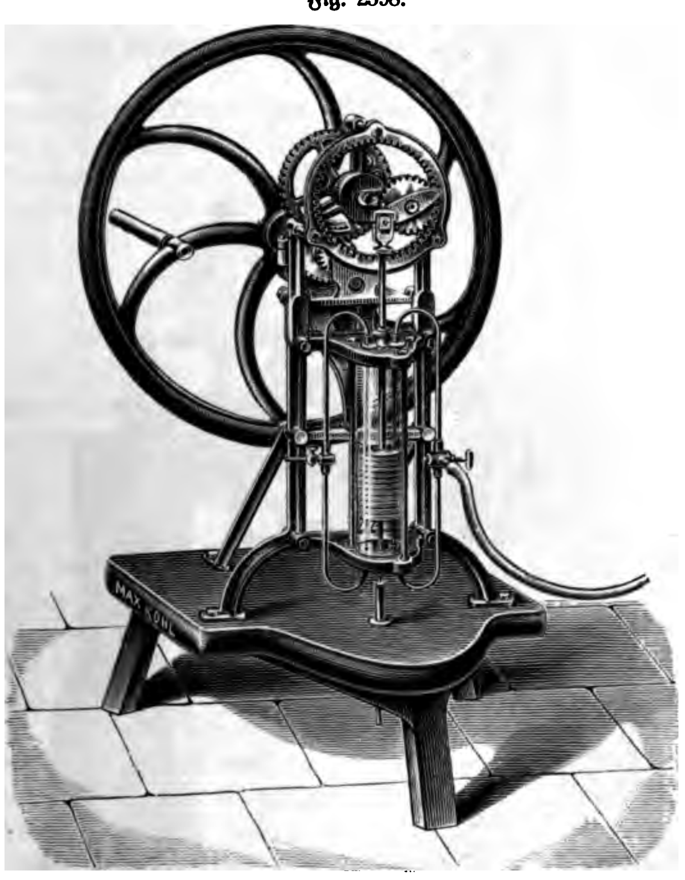
Sehr große Luftpumpen eigenartiger Konstruktion baut W. Spoerhase, vorm. C. Staudinger u. Co. in Gießen [2]). Ich gebe im nachfolgenden einige mir von der Firma gemachte Mitteilungen bezüglich des größten Modells, Fig. 2599.

„Der Stiefel ist doppeltwirkend. Den unteren Verschluß bildet das Hahnstück für einen Wechselhahn und Babinethahn. Seitlich, der Längsrichtung des Tisches

[1]) Eine Deleuilsche Pumpe einfacher Art, welche rasch ein Vakuum bis 5 mm oder Kompression bis 4 Atmosphären zu erzeugen gestattet, liefert die Société centrale de produits chimiques, ancienne maison Rousseau, 44 et 42 rue des écoles, Paris, Preis 300 Fr. (mit gläsernem Stiefel). — [2]) Eine Hahnluftpumpe mit Stiefel von 10 cm Durchmesser, 32 cm Höhe, Babinethahn, zwei Tellern von 30 und 18 cm Durchmesser, Barometerprobe und Hahnstücken zum Anbringen von Schläuchen u. s. w. kostet 1200 bis 2000 Mk. Eine solche mit Stiefel von 8 cm Durchmesser und 29 cm Höhe, Teller von 25 cm Durchmesser, 1000 Mk., wenn ohne Babinethahn, 600 bis 800 Mk.

zugekehrt, besitzt dasselbe, als Verbindungsstück mit dem auf dem Tische angebrachten Manometer, den beiden Tellern und einem Schlauchstück, einen Gewindefortsatz, welcher durch Schraubenmutter in passender Weise mit dem nächsten Hahnstück für Manometer verbunden ist, und auf gleiche Weise sind die übrigen Teile auf dem Tische durch ein Röhrensystem untereinander verschraubt.


Fig. 2598.



Das obere Ende des Stiefels verschließt luftdicht ein genau aufgeschliffenes zweites Hahnstück, ebenfalls einen Wechselhahn tragend, und seitlich durch eine eingepaßte Röhre mit den Rezipienten verbunden. Oberhalb dieses Messingkopfes sind die beiden Hauptträger aus Gußeisen durch ein zwischengeschraubtes Eisenstück fest verbunden, ebenso ganz am Ende. Dadurch bekommt das ganze obere Gestell eine bedeutende Festigkeit.

In dem unteren Zwischenträger sind drei starke, stählerne Spitzenschrauben im gleichseitigen Dreieck angebracht, welche, auf einen in der Mitte durchbohrten eisernen Ring wirkend, gestatten, die beiden aufgeschliffenen Hahnstücke und den Stiefel mit großer Gewalt zusammen zu pressen und so den Stiefel absolut luftdicht zu machen.

Sehr gut bewährt hat sich die Einrichtung, welche wir der Bewegung der Kolbenstange bezw. dem Kolben selbst gegeben haben. Die Stange trägt auf die genügende Länge ein je nach Verhältnis passend gearbeitetes grobes Gewinde, welches den Zweck hat, zwei einander entgegenwirkende Federn zwischen Schrauben-

muttern darauf anzubringen und gegen einen in der Mitte des Gewindes angebrachten Kreuzkopf wirken zu lassen. Letzterer hat eine sehr sichere Führung auf den beiden Stahlstangen, die in dem mittleren und oberen Zwischenstück eingeschraubt sind. Dreht man das Schwungrad nach rechts, so werden durch Trieb- und Zahn-

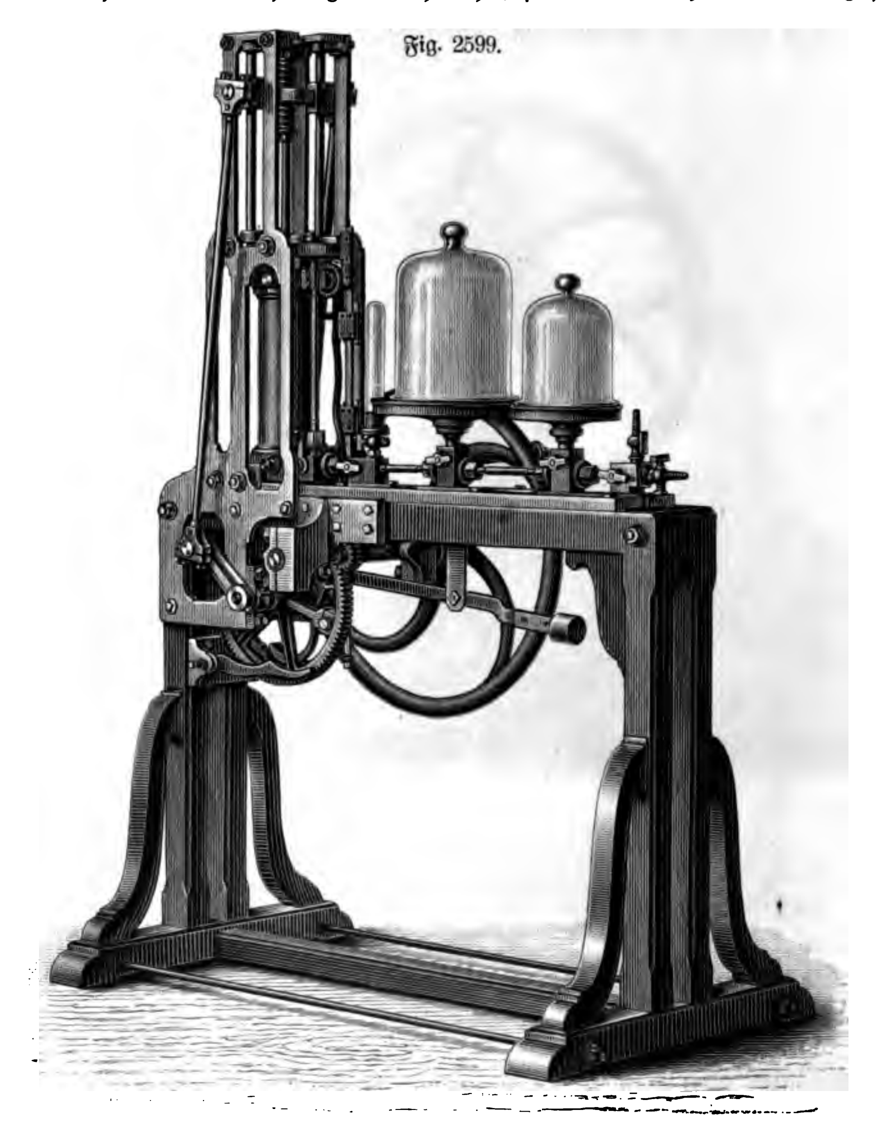


Fig. 2599.

rad die seitlich auf der Zahnradwelle aufgepaßten Steuerungsköpfe mit sehr gleichmäßig wirkender Kraft die Bleuelstangen eine wechselweise auf- und abwärts gerichtete Bewegung machen lassen und so auf Kreuzkopf und Kolbenstange eine sanfte, dem Verhältnis der Zahnradübersetzung entsprechend rasche Bewegung übertragen.

Nun ist die Stellung der Bleuelstangen so gewählt, daß dieselben eine kurze Strecke vor Erreichung des toten Punktes den Kolben zum Aufsitzen auf den oberen oder unteren Boden des Stiefels vermöge der sehr starken Federn zwingen.

indessen die obere bezw. untere Feder, bis jetzt noch ungespannt, durch die noch zurückzulegende Strecke der Bleuelstangen zusammengepreßt werden und so den Kolben mit großer, aber sanfter Gewalt gegen den oberen bezw. unteren Boden pressen. Da es nicht möglich ist, Stiefel und Kolben in idealer Form herzustellen, so daß beide einen wirklich vollkommenen Verschluß bilden, wird dadurch der zwischen Kolben und Stiefelboden stets bleibende schädliche Raum auf ein möglichst geringes Maß beschränkt.

Die Stopfbüchse befindet sich in dem oberen Hahnstück und ist von der Vorderseite zugänglich.

Die Steuerung der Wechselhähne geschieht durch eine Zahnstange, welche in das Zahnrad je eines Hahnes eingreift. Dieselbe wird durch einen Hebel auf- und abbewegt, welches Spiel durch zwei passend angebrachte Anschläge in genauen Grenzen gehalten wird. Die nähere Einrichtung der Steuerung ist folgende:

Unterhalb des zur Hälfte sichtbaren großen eisernen Zahnrades, welches durch Schwungrad und Trieb bewegt wird, befinden sich, am Gestell passend verschraubt, zwei Hebel, die beide durch eine Achse fest verbunden sind und sich zwischen Spitzen bewegen. Die Stellung derselben ist so eingerichtet, daß durch zwei seitlich auf dem betreffenden Radkranze diametral angebrachte Krummzapfen (Stehestifte) wechselweise der eine Arm gehoben bezw. der andere gesenkt wird und durch Vermittelung einer starken Feder, die zwischen zwei Stifte der Zahnstange greift, die letztere auf und nieder bewegt. Durch ein Gegengewicht wird das ganze so balanciert, daß sich Hähne und Steuerung in jeder Lage ruhig stellen lassen.

Sobald also der Kolben seinen Weg nach aufwärts beginnt, wird der rechtsliegende Arm die Stange aufwärts bewegen und die Hähne so stellen, daß eine Verbindung des oberen Stiefelraumes mit der atmosphärischen Luft (durch Vermittelung eines Ventils) und des unteren mit dem Rezipienten stattfindet. Beim Abwärtsgehen des Kolbens dagegen wird der links liegende Arm durch den darübergreifenden Krummzapfen abwärts gedrückt und, da er mit dem anderen Arm fest verbunden ist, eine Bewegung der Zahnstange nach abwärts bewirken, so daß die Bohrung des oberen Hahnes durch die seitliche Röhre mit den Rezipienten und die des unteren Hahnes mit der Atmosphäre (ebenfalls durch Vermittelung eines Ventils) in Verbindung steht.

Tritt ein Babinethahn hinzu, so wird die Bohrung des unteren Hahnes insofern verändert, als seine Ausblasebohrung mit dem Babinethahn in Verbindung steht, und durch diesen, wenn letzterer außer Tätigkeit, mit der Atmosphäre.

Nachdem man eine dem schädlichen Raume entsprechende Verdünnung erreicht hat, dreht man den Babinethahn mittels eines angebrachten Griffes um 90° bis zu einem angebrachten Anschlage, so daß die Ausblasebohrung des unteren Wechselhahnes mit einer zweiten Bohrung des Babinethahnes in Verbindung steht. Hierdurch tritt der obere Raum des Stiefels mit dem unteren schädlichen Raume in Kommunikation, die Luft des schädlichen Raumes von der Dichte der Atmosphäre breitet sich darin aus und es wird dann in ersterem beim Aufwärtssteigen des Kolbens die Luft durch die obere Ausblasebohrung verdrängt.

Der Kolben besteht aus gut präparierten Lederscheiben und wird in der Art konstruiert, daß durch die durchbohrte Kolbenstange (der Längsachse nach) beständig Öl an die Wände des Cylinders fließen kann und so ein Trockengehen vermieden wird."

Ein gewöhnliches Dampfmaschinenmodell kann, indem man das Schwungrad mit der Hand dreht, als Modell der schon auf S. 131 besprochenen Schieber-Luftpumpe gebraucht werden.

Bei Anwendung dieser Pumpe, welche mit dem Auditorium durch eine zollweite Röhre in Verbindung steht, benutze ich einen Luftpumpenteller von etwa 50 cm Durchmesser, auf welchen Rezipienten von 30 cm Durchmesser aufgesetzt werden. Die gleichfalls zöllige Leitung zum Teller ist mit einem Lufteinlaßhahn und mit einem Filter von Drahtnetz versehen. Letzteres dient dazu, um beim Blasensprengen, Eindrücken von Glasscheiben u. s. w. zu verhindern, daß Fetzen und Splitter in die Pumpe gelangen. Das Arbeiten mit dieser Pumpe ist sehr bequem, besonders wenn die Windkessel angeschlossen sind, da es genügt, den Hahn aufzudrehen, um sofort den Rezipienten zu evakuieren, auch wenn die Pumpe nicht mehr in Funktion ist.

Bei Anschaffung einer Luftpumpe wird man eine Prüfung vorzunehmen haben, ob die Pumpe die ausbedungene oder versprochene Leistungsfähigkeit wirklich besitzt[1]).

Man hat besonders darauf zu achten, welchen Verdünnungsgrad sie, vollkommene Trockenheit vorausgesetzt, zu erzeugen vermag, wie rasch sie arbeitet, und ob ihr Schluß gut ist. Bei Beurteilung des Verdünnungsgrades ist der Versuch entweder ganz ohne, oder doch nur mit ganz kleinem Rezipienten zu machen; umgekehrt bei Beurteilung der Schnelligkeit des Arbeitens mit einem möglichst großen. Der Schluß gilt als befriedigend, wenn eine unter den Rezipienten gesetzte Barometerprobe ihren Stand beibehält, also der Sperrhahn und der Teller, sowie der Rezipient selbst in Ordnung sind. Gewöhnliche Pumpen sollten die Barometerprobe auf 1 mm herunter bringen. Ob die Barometerprobe — ein abgekürztes Heberbarometer — selbst gut ist, ist schwer zu untersuchen; hat man Zweifel, so ist das nochmalige Auskochen nicht schwierig. Der Steuerungshahn und die Kolben können nur bei ganz neuen Instrumenten noch so gut sein, daß auch durch sie keine Luft eindringt, wenn man das Instrument stehen läßt. Um sich über die Größe des schädlichen Raumes Gewißheit zu verschaffen, schließe man den Rezipienten ab und pumpe den Verbindungskanal aus; nun wird der Kolben fest auf den Boden des Stiefels gesetzt und der Steuerungshahn so gestellt, daß er die Verbindung zwischen Kanal und Stiefel herstellt; die Barometerprobe darf dabei um nicht mehr als 1 bis 2 mm steigen. Kann man den Rezipienten nicht absperren, sondern muß den Versuch mit einem kleinen machen, so wird der schädliche Raum weniger bemerkbar.

Bei der Untersuchung der Hähne dreht man dieselben einigemal rasch hin und her, zieht sie vorsichtig heraus und sieht nach, ob sich an denselben keine ungleiche Reibung zeigt. Ist dieses nur einigermaßen der Fall, so sollte man dieselben nicht annehmen, sie verlieren den Schluß gar zu bald.

---

[1]) Bezugsquellen von Kolbenluftpumpen sind: W. Bauer, Mechaniker, Berlin O., Königsbergerstr. 29. Gundermann-Zons, Mechaniker, Köln a./Rh., Rheingasse 10. Kensberg und Ulrich, Mechaniker, Berlin C., Stralauerstr. 56. Phys. mechan. Institut von Prof. Dr. Edelmann, München, Nymphenburgerstr. 82. L. Reimann, Mechan. Werkstätte, Berlin SO., Schmidtstr. 32. W. Spoerhase, vorm. C. Staudinger u. Co., Werkstätte für wissenschaftliche Präzisionsinstrumente, Gießen, Steinstr. 37. P. Stückrath, Werkstätte für wissenschaftliche Instrumente, Friedenau b. Berlin, Albestr. 11. Wendt u. Peschla, Mechan. Werkstätte, Berlin N., Chausseestr. 10 u. a.

Eigentliche Ventilluftpumpen werden für physikalische Zwecke wohl nicht mehr ıgefertigt, dagegen sind die Stöpselluftpumpen in Verbindung mit einem Babinet= ;en Hahne sehr bequem. Pumpen mit dem Graßmannschen Hahne haben den ɔrteil, daß sie auch zum Komprimieren gebraucht werden können, doch ist der ebrauch der Luftpumpe zum Komprimieren ein sehr beschränkter.

Was die Hähne selbst betrifft, so sollte ihr Kern bei mehrfacher Durchbohrung t gar zu klein genommen werden, an der Basis des Kegels nicht unter 2 cm ırchmesser, da die Schlußfläche sonst zu klein wird. Solche kleine Hähne sind ɔhl in mehrfacher Beziehung leichter zu bearbeiten, schließen neu auch recht gut, ıd aber schneller abgenutzt; sie ertragen auch nur eine ganz feine Bohrung, wo= rch das Durchgehen der Luft erschwert wird, namentlich wenn, wie fast unvermeid= h, auch noch etwas Fett hineinkommt; außerdem können sie wegen der kleinen ıhrung nicht so gut nachgeschmirgelt werden, wenn sie einmal Not gelitten haben, il die Löcher nachher nur noch zum Teil oder gar nicht mehr aufeinander ssen. Anders ist es freilich bei jenen Hähnen, die nur einfach gebohrt sind, oder r wenig gebraucht werden, wie die Sperrhähne der Probeglocken für Mano= ter= und Barometerproben, sowie für den Teller. Daß aber diese letzteren ihne vorhanden seien, ist sehr nötig; denn nur durch das Abschließen der Probe= cken kann die Barometer= oder Manometerprobe bei gewissen Versuchen vor haden bewahrt werden, und ein besonderer Hahn zum Verschluß unter dem ller ist für alle jene Versuche nötig, wo man das Vakuum einige Zeit erhalten ll, da der Steuerungshahn nach einiger Zeit bei dem unaufhörlichen Hin= und rdrehen desselben seinen Schluß nicht erhalten kann. Auch zum Luftzulassen ist ser zweite Hahn bequem, besonders wenn er ebenfalls doppelt durchbohrt ist. aß der Griff dieses Hahns, wenn der Teller nahe an den Tisch des Instrumentes liegen kommt, etwas lang sein müsse, ist für sich klar, wenn man die Bequemlich= t nicht ganz beiseitesetzen will. Die Hähne sollten von Kanonenmetall gemacht ıd nicht stark konisch sein.

Hat die Luftpumpe eine besondere Probeglocke für das Manometer, so muß s Quecksilbergefäß von Eisen sein oder von Glas; wäre es von Messing, so müßte dick mit Siegellacklösung bestrichen werden, da der gewöhnliche Schellackfirnis ets Risse bekommt, durch welche hindurch dann das Quecksilber auf das Metall drückt wird und dieses zerfrißt.

Was den Teller betrifft, so muß man darauf sehen, daß derselbe mit Glas legt und nicht unter 0,2 m breit sei. Das Ende der Kommunikationsröhre muß n Gewinde haben und entweder über die Glasplatte hervorstehen, oder das Glas uß weiter ausgebohrt sein und das Gewinde nur über die Messingplatte hervor= ehen; dadurch wird verhütet, daß Quecksilber, Wasser und dergleichen in das nnere der Luftpumpe kommen.

Luftpumpen, bei welchen der Teller unmittelbar auf dem Stiefel sitzt, und die tange nach unten ausgezogen wird, haben den Nachteil, daß kein Raum für einen veiten Hahn zum Absperren übrig bleibt, auch sind die unter dem Rezipienten be= ndlichen Gegenstände den Erschütterungen beim Auspumpen gar zu stark ausgesetzt.

In bezug auf die Verminderung des schädlichen Raumes kommt es darauf an, aß die dem Boden des Cylinders zugekehrte Kolbenfläche durch eine daran befind= iche kurze konische Warze bis beinahe auf den Kern des Steuerungshahns reiche, nd genau auf den Boden des Cylinders eingeschliffen sei; ebenso muß die Kolben=

platte seitlich den Cylinder ausfüllen und durchaus nicht enger sein als die Filzscheiben, welche den Kolben bilden. Eine eigene Art von schädlichem Raume sitzt manchmal in fehlerhaft gebohrten Hähnen. Für die gewöhnlichen Konstruktionen ist wohl der Senguerdsche Hahn der zweckmäßigste. Ein Ventil von der nach außen führenden Öffnung des Steuerungshahns erleichtert die Arbeit des Auspumpens sehr; allein der schädliche Raum wird dann um so schädlicher, da er nun der Federkraft des Ventils entsprechend komprimierte Luft enthält.

Die Kurbel ist bei manchen Luftpumpen — bei zweistiefeligen wohl immer — zweiarmig, und in diesem Falle muß das Rad so groß sein, daß die Kolben in weniger als einer ganzen Umdrehung ihren Weg machen, damit man die Hände nicht zu wechseln braucht. Jedenfalls muß das Achsenlager des Rades eine von den Stiefeln unabhängige Befestigung haben. Überhaupt muß das ganze Instrument solide auf einer Grundplatte von altem geöltem Holze oder Metall erbaut sein, so daß man es im ganzen auf einen beliebigen Tisch setzen kann.

Keine unwesentliche, aber von den Mechanikern nicht immer beachtete Rücksicht besteht endlich darin, daß die Maschine ohne zu viel Umstände, soweit als zur vollständigen Reinigung erforderlich ist, zerlegt werden könne, und alle Teile leicht zugänglich seien.

Die Behandlung der Luftpumpe. Jede Luftpumpe bedarf ihrer Natur nach einer sehr sorgfältigen Behandlung, wenn sie längere Zeit gute Dienste leisten soll. Vor allem ist Reinlichkeit notwendig, und sie sollte daher alljährlich einmal ganz gereinigt werden und frisches Fett erhalten. Es geschieht dieses am zweckmäßigsten, wenn die Versuche über das Kochen des Wassers im luftverdünnten Raume und über die Eisbereitung durch Verdunsten des Wassers beendigt sind. Die Reinigung geschieht in einem warmen Zimmer, dessen Temperatur die Luftpumpe angenommen hat. Man säubert die Stiefel, Kolben und Hähne mit Fließpapier, das man anfänglich mit etwas Alkohol befeuchten kann; nachher gibt man den Kolben und Hähnen wieder frisches Fett. Bei den Kolben muß das Fett auf diese und nicht in den Cylinder gestrichen werden, weil im letzteren Falle das Überflüssige gegen den Boden des Cylinders getrieben wird und hier das vollständige Anliegen der unteren Kolbenfläche hindert, wodurch ein bedeutender schädlicher Raum erzeugt wird; außerdem werden dadurch die Kanäle verstopft. Für die Kolben nimmt man Schweinefett, für die Hähne kann man Talg oder eine Mischung von diesem und gleichviel Schweinefett oder eine Mischung von 3 Tln. Talg und 1 Tl. Wachs nehmen[1]). Die Stangen und Getriebe erhalten Öl. Es ist gut, wenn man das zu verwendende Fett in einem bedeckten Gefäße aufbewahrt und es vor der Verwendung noch mit den Fingern durchgreift, um alle harten Teile zu entfernen. Für die Kolben wird auch sogenanntes Knochenfett verwendet, das in einer etwa 5 bis 10 mm hohen Schicht darauf gegossen wird. Die Kolben schließen damit besser und gehen leichter, müssen aber so gedrungen passen, daß sie das flüssige Fett nicht durchlassen. Von anderer Seite wird das Knochenöl als unzweckmäßig erklärt und der Gebrauch von ganz reinem Maschinenöl empfohlen, welches nicht oxydiert. Gewöhnlich wird von den Mechanikern das Öl, welches sie für das geeignetste halten, in einer Flasche beigegeben. Damit die Böden der Stiefel, sowie die Messingteile der Kolben und Ventile nicht vom Öl angegriffen werden

[1]) Über Hahnfett siehe auch S. 137, Anmerk. 1 und S. 591.

(unter Bildung von ölsaurem Kupfer), werden sie zuweilen mit einer Zinnschicht überzogen.

Um das Eindringen von Öl unter die Kolben und in die Kanäle zu hindern, ist es zweckmäßig, jeweils sofort nach dem Evakuieren den Rezipienten abzusperren und Luft in die Stiefel einzulassen.

Nach Fr. C. G. Müller läßt sich aber zuweilen eine schlecht funktionierende Luftpumpe dadurch in Funktion bringen, daß man, während sie langsam in Tätigkeit gesetzt wird, etwas Öl in das Loch des Tellers eingießt. (Z. 7, 296, 1894.)

Kann die Luftpumpe nicht im Glaskasten aufbewahrt werden, so macht man ein darüber passendes Futteral aus Pappe, um sie vor Staub zu schützen.

Eine nicht unwesentliche Vorsichtsmaßregel zur Erhaltung der Luftpumpe besteht auch darin, daß man es nicht versucht, die Kolben zu bewegen, wenn das Instrument in der Kälte steht; immer muß dasselbe zur Winterszeit einige Zeit vor dem Gebrauche in das geheizte Zimmer gebracht werden.

Bei den Versuchen bestreicht man den abgeschliffenen Rand der Glocken mit einer Talgkerze, oder mit sogenanntem konsistentem Fett, wie es zum Schmieren von Maschinen benutzt wird.

Das Pumpen muß im Anfange langsam geschehen, da die Luft der engen Kanäle wegen Zeit braucht, um sich gleichförmig im ganzen Raume zu verbreiten; das hörbare Zischen der Luft, oder das noch andauernde Sinken der Barometerprobe gibt hierfür schon von selbst ein Maß ab; sowie die Verdünnung fortschreitet, arbeitet man dann schneller. Ohne diese Vorsicht arbeitet man sich unnötigerweise ab und das Durchmachen einer Anzahl von Luftpumpenversuchen ist ja ohnehin ermüdend genug. Schüler aber, oder ungeübte Gehülfen, haben gewöhnlich nicht die Fertigkeit, eine Kurbel gleichförmig herumzutreiben, und stoßweise Bewegungen sind für das Instrument immer sehr nachteilig.

Man sollte es nie versuchen, einen Rezipienten auch nach nur wenigen Zügen von dem Teller wieder zu entfernen, ohne vorher Luft zugelassen zu haben. Es leidet dabei, je nach ihrer Konstruktion, die Luftpumpe selbst und der Rezipient wird leicht zerbrochen. Das Entfernen der Rezipienten geschieht übrigens immer so, daß man dieselben drehend über den Rand des Tellers hinausschiebt.

Immer wählt man den kleinsten noch brauchbaren Rezipienten zu den Versuchen aus. Rezipienten von beliebiger Kleinheit verschafft man sich leicht aus Trinkgläsern mit starkem Boden, deren Rand eben geschliffen wird.

Wenn man die ganze Reihe der Luftpumpenversuche fertig hat, so muß der Glasteller und der geschliffene Rand der Glocken wieder sorgfältig von Fett gereinigt werden.

Von v. Babo wurden Ringe aus Patentgummi statt des Fettes zum Dichten der Rezipienten benutzt. Terquem (1881) benutzt einen Teller mit eingedrehter Rinne, in welche die Glocke gerade einpaßt. Die Rinne wird durch Wasserdampf erwärmt, mit einem unter 100° schmelzenden Kitt beschickt, die Glocke eingesetzt und nun erkalten gelassen. Es eignet sich dies Verfahren namentlich dann, wenn das Vakuum längere Zeit unverändert erhalten bleiben soll [1]).

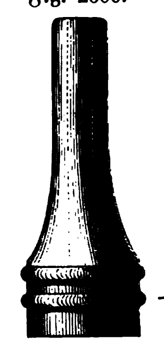
Öfter kommt man in den Fall, daß die Luft in einem Gefäße verdünnt werden soll, welches nicht auf die Luftpumpe geschraubt oder auf den Teller ge-

---

[1]) Über Dichtung mit Öl siehe Reiff, Z. 17, 157, 1904 und Fig. 2610, S. 930.

setzt werden kann. Wenn die Luftpumpe kein seitliches Rohr, wie in Fig. 2586, hat, so schraubt man ein durchbohrtes Stück Messing, wie Fig. 2600, fest auf das Ende des Saugrohrs der Luftpumpe; mittels entsprechend gebogener Glasröhren, welche unter sich mit der Luftpumpe und dem zu verdünnenden Raume durch dicke oder durch gefederte Kautschukröhren vereinigt werden, setzt man nun die Luftpumpe mit letzterem in Verbindung.

Fig. 2600.



$\frac{1}{1}$

Sollte nach und nach der Schluß der Kolben an einer Luftpumpe nachlassen, so kann sich derselbe durch festeres Anschrauben der beweglichen Platte der Kolben ein und das andere Mal wieder herstellen lassen. Mitunter läßt sich einem Kolben dadurch wieder helfen, daß man die Filz- oder Lederscheiben auseinander nimmt und sie in etwas veränderter Lage, wenn es sein kann, oder mit frischem Fett dazwischen neuerdings zusammenpreßt.

Die Hähne müssen, so oft sie herausgenommen wurden, durch die daran befindliche Ziehschraube wieder so fest angezogen werden, daß sie noch ziemlich leicht bewegt werden können. Die Steuerungshähne müssen bei Selbststeuerung leichter gehen als die übrigen; wie leicht die Hähne gehen müssen, das ist mit Worten freilich nicht zu bestimmen; allein durch wiederholtes Drehen eines gehörig angezogenen Hahns — etwa wenn die Maschine neu vom Mechaniker kommt — erwirbt man sich bald das richtige Gefühl hierfür. Sollte die Ziehschraube nicht mehr wirken können, so kann man leicht mit der Feile hier wieder Luft schaffen, ohne am Hahn etwas zu verderben.

Wäre der Hahn auf diesem Wege nicht zum Schlusse zu bringen, oder ließe sich der Kolben nicht mehr weiter zusammenpressen, so muß die Maschine an den Mechaniker geschickt werden; nur wenn man im Arbeiten schon sehr geübt wäre, dürfte man es versuchen, mittels fein geriebenen Bimssteins und Öls einen Hahn nachzuschmirgeln, indem man denselben unter öfterem Herausziehen in seiner Hülse hin und her dreht, bis sich überall ein gleichförmiges Matt zeigt. (Vgl. S. 437.)

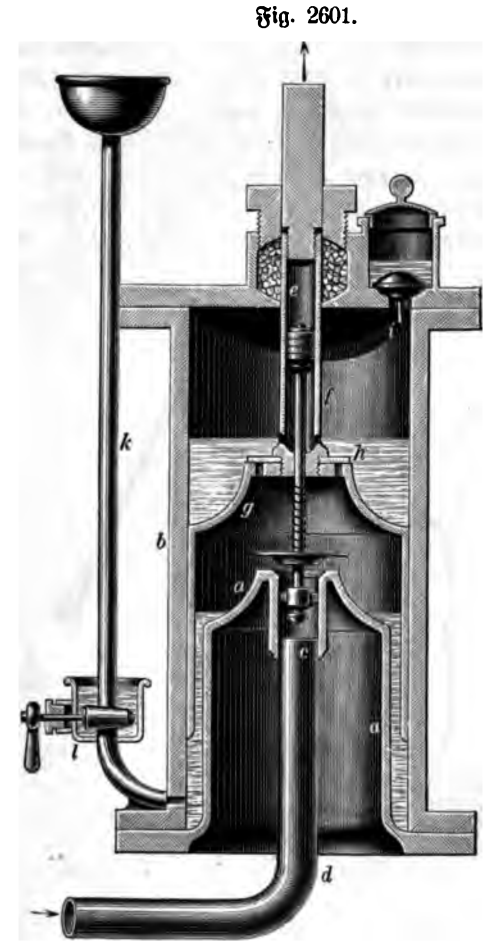
Mitunter löst sich die Glasplatte des Tellers von ihrer metallenen Unterlage infolge der ungleichen Ausdehnung beider Substanzen durch die Wärme. In diesem Falle schraubt man den Teller ab, erwärmt Glas und Metall, jeden Teil für sich, so weit, daß der Kitt gut darauf fließt, bringt das Glas mit etwas starker Papierunterlage auf einen sehr ebenen Tisch und preßt den metallenen Teil mittels einer hölzernen Schraubzwinge genau konzentrisch auf das Glas. Nach dem Erkalten entfernt man den herausgequollenen Kitt mit dem Messer. Wäre frischer Kitt nötig, so nimmt man Schellack mit etwa $^1/_6$ Wachs und $^1/_6$ Terpentin.

Läßt der Schluß einer Luftpumpe plötzlich nach, so muß man den Sitz des Übels aufsuchen. Es läßt sich derselbe sehr oft nur dadurch ermitteln, daß man den Stiefel des Instrumentes mit Luft füllt, den Hahn zum Komprimieren stellt und das ganze Instrument unter Wasser setzt, während man den Kolben hineintreibt; die aufsteigenden Luftblasen werden den Sitz des Übels anzeigen, und man wird dann auch beurteilen können, ob man demselben selbst abhelfen könne oder nicht.

Häufig liegt der Fehler darin, daß die Glasglocke über der Barometerprobe nicht hinreichend fest angezogen ist, oder daß einer der Hähne nicht hinreichend von Öl gereinigt wurde.

Fände sich der Fehler an einer Stelle, welche mit Leder unterlegt ist, so muß man frisches Leder anwenden. Am besten eignet sich hierzu etwas dickes sämischgares Leder, das man mit einer warmen Mischung aus gleichen Teilen Talg und Schweinefett tränkt. Man hält sich ein kleines Stück solchen Leders im Vorrat. Fehlt es an einer Stelle, wo etwa Glas eingekittet ist, so muß man den Teil abschrauben, erwärmen, das Glas herausnehmen und mit Siegellack frisch einkitten (S. 498).

Fig. 2601.



245. Ölluftpumpen. Bei diesen wird die Luft aus dem schädlichen Raum durch Öl verdrängt. Eine ältere Form für größere Leistungen ist die Luftpumpe von Robert Gill, Fig. 2601[1]). Der Boden des Cylinders ist glockenartig nach innen eingestülpt. Auf diese Einstülpung paßt ganz genau die untere Fläche des gleichfalls glockenförmig gestalteten Kolbens *g*. Der untere Teil der Kolbenstange ist ausgehöhlt und in demselben bewegt sich der am Ende kolbenartig verdickte, jedoch nicht luftdicht anschließende Stiel des Saugventils *c*. Der Stiel ist nicht ganz luftdicht durch den oberen Teil des Kolbens hindurchgeführt. Letzterer ist außerdem noch mit einem Kranz von Durchbohrungen versehen, die durch die Kupferscheibe *h* bedeckt sind. Der Kolben ist mit Öl bedeckt. Zieht man denselben in die Höhe, so träufelt durch die erwähnten Poren etwas Öl herunter. Damit dasselbe nicht in das Saugrohr *d* gelangen kann, bleibt das Ventil *c* infolge der Wirkung einer an seinem Stiele angebrachten zusammengepreßten Spiralfeder noch einige Zeit geschlossen. Erst wenn das Niveau des Öles unter dem Kolben hinreichend gesunken ist, hebt sich das Ventil und läßt Luft aus dem Saugrohr *d* in den erzeugten luftleeren Raum eintreten. Gleichzeitig entweicht die über dem Kolben vorhandene Luft durch das Ventil *i*, welches mit einer Ölschicht bedeckt ist. Geht der Kolben wieder abwärts, so entweicht die unter ihm befindliche Luft durch die früher erwähnten Poren in den darüber sich herstellenden luftleeren Raum, nachdem sofort bei Beginn des Rückganges das Ventil *c* sich geschlossen hatte. Da nun beim Aufgang des Kolbens Öl durch die Poren herabgeträufelt war, so befindet sich unter dem Kolben etwas mehr Öl, als Raum vorhanden ist. Sobald sich daher der Kolben seiner tiefsten Lage nähert, erfüllt sich der ganze Raum unterhalb mit Öl und der Überschuß desselben wird durch die Poren wieder hinausgepreßt. Auf diese

[1]) Siehe Revue industrielle, déc. 1874, 419 und Polytechnisches Centralblatt 1875, 161.

Weise ist der schädliche Raum vermieden. Freilich bleibt der andere Mangel, die Absorption und Abgabe von Luft durch das Öl[1]). Um anfänglich den Cylinder mit Öl füllen zu können, ist das Trichterrohr *k* mit dem von Öl umgebenen Hahn *l* angebracht.

Eine andere Luftpumpe, bei welcher der schädliche Raum gleichfalls durch eine Flüssigkeit, aber nicht durch Öl, sondern Quecksilber beseitigt wird, konstruierte der Mechaniker J. Kravogl in Innsbruck (1867), was hier lediglich des historischen Interesses wegen angegeben wird. Die Stiefel bestehen aus Glas, die Kolben (Plungerkolben) aus Stahl. Durch Benutzung des Regnaultschen Kunstgriffes, die Luft gegen Ende der Evakuierung nicht in die Atmosphäre, sondern in einen luftverdünnten Raum austreten zu lassen, kann man mit der Pumpe (nach v. Waltenhofen) eine Verdünnung von 1 : 24000 erzielen.

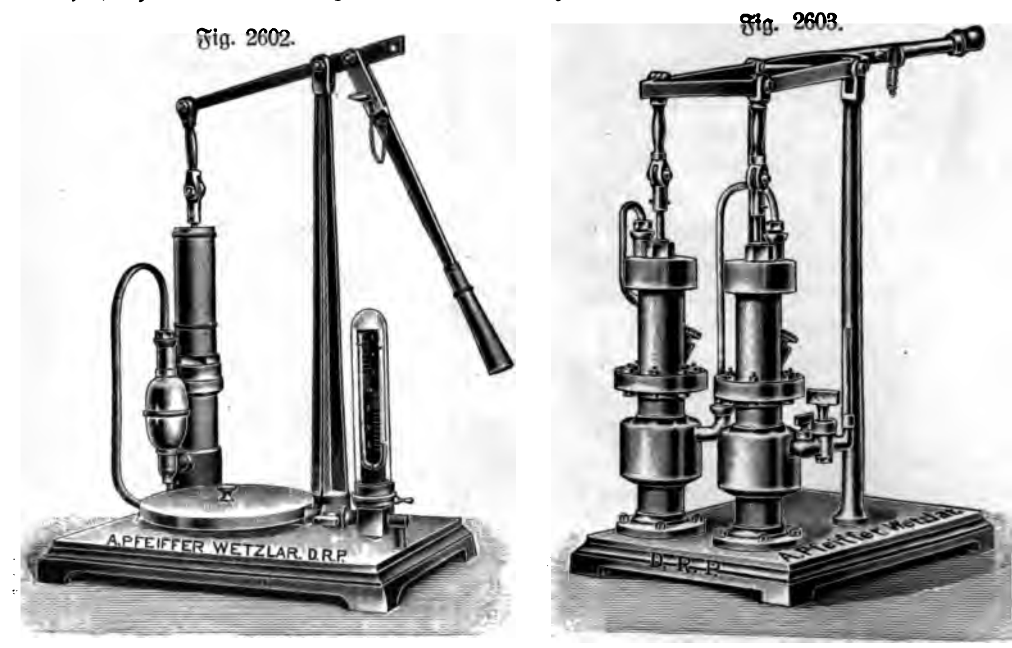


Fig. 2602. Fig. 2603.

Weit besser als alle bisher genannten Pumpen eignet sich, speziell dann, wenn hohes Vakuum erzielt werden soll, die Luftpumpe von Fleuß[2]), Geryk-Öl-Luftpumpe genannt, welche nach H. Hahn-Machenheimer (Z. 14, 285, 1901) folgende durch Fig. 2606 dargestellte Einrichtung hat.

Der Kolben ist durch eine Ledermanschette *C* und die darüber lagernde Ölschicht gedichtet und befindet sich in der gezeichneten tiefsten Stellung in solcher Lage, daß die durch die Saugröhre *A* in den Hohlraum *B* eintretende Luft durch die an-

[1]) Wie die Fleußsche Pumpe zeigt, ist es aber möglich Öl zu beschaffen, bei welchem diese Störung unmerklich wird. — [2]) In Deutschland und anderen Ländern patentiert, nach dem Inserat Bd. I (1), S. 7 zur Zeit nur zu beziehen von Arthur Pfeiffer in Wetzlar. Einfache Pumpen (Fig. 2602), bei welchen der eine Stiefel den Auspuff des anderen aussaugt (120 bis 800 ccm Leistung; 0,14 mm Vakuum), kosten 100 bis 280 Mk.; zweistiefelige (Fig. 2603 und 266, S. 136) (200 bis 400 ccm Leistung pro Hub; Vakuum 0,0002 mm + Öldampftension) 350 bis 565 Mk.; solche mit elektrischem Antrieb (Fig. 2604 und 2605) 700 bis 1665 Mk. Außerdem werden noch größere Pumpen bis zu 3 cbm Leistung pro Minute geliefert.

gedeutete Öffnung in den Stiefel gelangen kann. Beim Emporziehen des Kolbens wird sie zusammengedrückt, da der Kolben nunmehr über die Einströmungsöffnung gelangt, und entweicht durch das Ventil *G*, welches durch die Ledermanschette *J* abgedichtet, aber beim Anstoßen des Kolbens gegen den Druck der Feder *K* um 6,5 mm gehoben wird. Auch dieses Ventil ist mit Öl

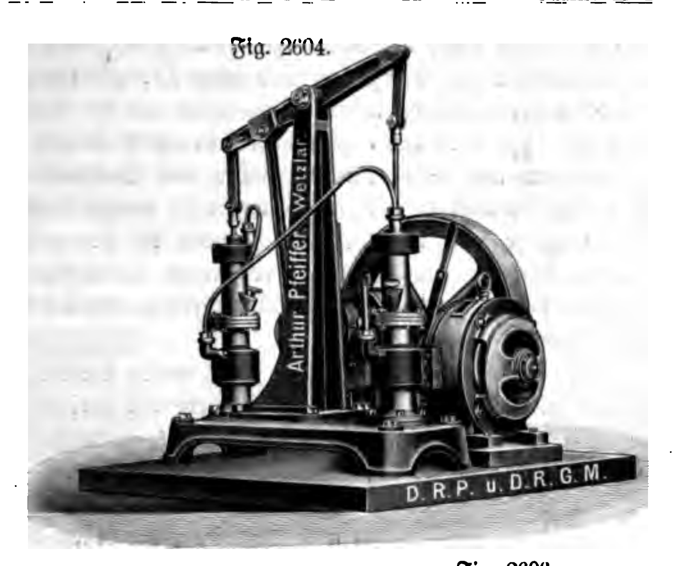


Fig. 2604.

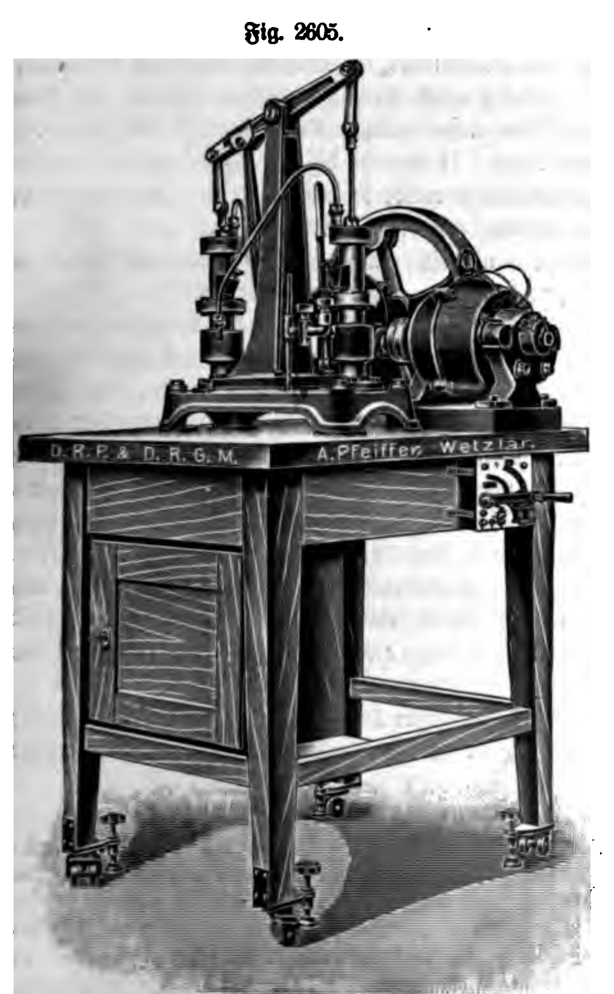


Fig. 2605.

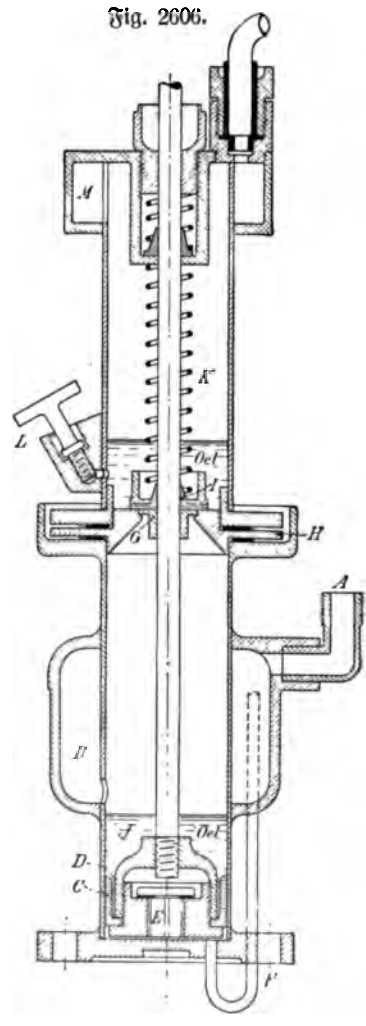
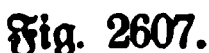


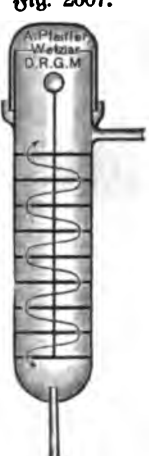
Fig. 2606.



bedeckt, welches durch den Rohrstutzen L eingefüllt wird. Bei der höchsten Stellung des Kolbens bilden die untere und obere Ölmasse ein zusammenhängendes Ganze und beim Heruntergehen des Kolbens, wobei sich das Ventil G wieder schließt, kann keine Luft von oben eindringen. Das Ventil E bewegt sich nur beim Beginn des Auspumpens und bleibt untätig, wenn eine Verdünnung von 13 mm erreicht ist. Es ermöglicht auch etwa durchgesickertem Öl wieder nach oben zu gelangen. F ist ein Saugrohr zum Entlasten des Kolbens bei den ersten Hüben, M eine ringförmige Kammer zum Abfangen verspritzter Öltröpfchen. Die Pumpe ermöglicht angeblich mit einer guten Trockenröhre Verdünnung bis zu 0,0002 mm + Tension des Öldampfs[1]) zu erreichen.

Da alle Ventile und der Kolben in Öl laufen und die Dichtung durch Manschetten bewirkt wird, so erfordert sie zum Betriebe nur geringe Kraft. Sie hält die Verdünnung beliebig lange und kann deshalb auch zu langsamem Auspumpen verwendet werden; auch kann sie als Gebläsepumpe dienen.


Fig. 2607.



Man kann damit sowohl die gewöhnlichen Luftpumpenversuche machen, wie auch diejenigen, bei denen bisher eine Quecksilber-Luftpumpe nötig war. Vollkommen kann natürlich die Ölpumpe die Quecksilberpumpe nicht ersetzen, da die Dampftension des Öls größer sein wird als die des Quecksilbers, auch wenn das beste Spezialöl verwendet wird. Häufig wird sie wohl als Vorpumpe vor Anwendung der Quecksilberpumpe benutzt. Dabei entsteht allerdings die Gefahr, daß letztere durch Öldämpfe, die sich schwer wieder herausbringen lassen, verunreinigt wird, so daß sie kein höheres Vakuum mehr zu erzeugen vermag als die Ölpumpe direkt.

Vor die Pumpe muß ein wirksamer Phosphorsäure-Trockenapparat geschaltet werden.

Nach Reiff (Z. 17, 155, 1904) haben die üblichen Trockengefäße den Nachteil, daß die durchgesaugte Luft nur zum kleinen Teil mit der Phosphorsäure in engere Berührung kommt, von dieser nur die oberste Schicht wirksam ist und die Erneuerung der verbrauchten Säure viel Mühe verursacht und durch die beim Ausspülen entstehende Hitze das Gefäß gefährdet. Er gibt deshalb der Trockenvorrichtung die Form Fig. 2607. Die Phosphorsäure liegt dabei auf Tellern, die zu einem leicht herausnehmbaren Einsatz verbunden sind, derart, daß das Gas zickzackförmig über jeden einzelnen Teller wegströmen muß. Ist die Phosphorsäure verbraucht, so wird nach Abnehmen des Helms H der Einsatz durch einen anderen bereitgestellten mit frischer Füllung ersetzt. Die Dichtung erfolgt durch eine Sperrflüssigkeit in der Richtung R[2]).

Für die gewöhnlichen Versuche (Magdeburger Halbkugeln, Gefrierversuch u. s. w.) wird ein Luftpumpenteller durch dickwandigen Gummischlauch mit dem Saugrohre der Pumpe verbunden. Der Trockenapparat ist hier unnötig.

[1]) Die Tension des Öldampfes wirkt bei Messung des Druckes mit dem Mac Leodschen Manometer (S. 998) auf beiden Seiten, wird deshalb nicht erkannt, ebenso wie die Tension des Quecksilberdampfes. Durch Zersetzung des Öldampfes durch elektrische Entladungen und Absorption der Sauerstoffreste durch Phosphor soll sich das Vakuum verbessern lassen. — [2]) Der Apparat ist zu beziehen von A. Pfeiffer in Wetzlar zu 15 Mk.

Die Firma A. Pfeiffer versieht neuerdings die Hähne mit Öldichtung (Fig. 2601) nach Gill (Fig. 2608, 2609 a und b, vergl. auch S. 593, Fig. 1928), auch werden Rezipienten mit Öldichtung nach Reiff (Fig. 2610) geliefert, ferner Metallschläuche (Fig. 11, S. 23) zur Verbindung von Pumpe und Rezipient.

Außer den genannten sind noch andere Ölluftpumpen konstruiert und patentiert worden, doch kann eine Beschreibung erst an späterer Stelle gegeben werden, da zur Zeit wegen geltend gemachter Einsprüche das Patentverfahren noch nicht endgültig abgeschlossen ist.

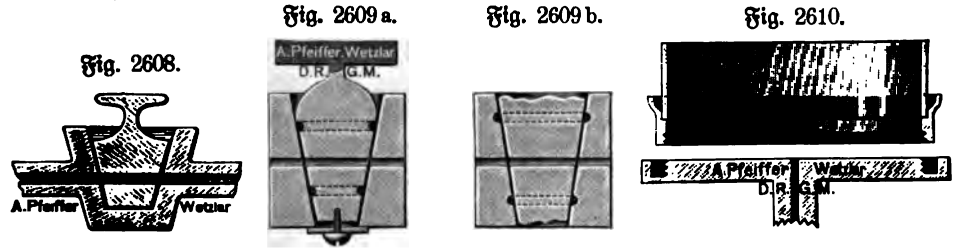


Fig. 2608. Fig. 2609 a. Fig. 2609 b. Fig. 2610.

Ferner hat die Firma A. Pfeiffer neuerdings eine Pumpe in Bau, deren Leistungen die der Geryk pumpe erheblich übertreffen sollen. Sie unterscheidet sich von derselben durch Verwendung einer anderen Flüssigkeit. Die Ölpumpe saugt wohl bei jedem Spiel eine Quantität Luft aus dem Rezipienten, läßt aber gleichzeitig Öldampf hinein, welcher natürlich durch die Pumpe nicht mehr entfernt werden kann. Ursache ist vermutlich die auf S. 928, Anmerkung 1 erwähnte Absorption der Luft beim Komprimieren. Bei Verdünnung tritt zunächst Ausscheideverzug (siehe S. 1009) ein, so daß der Druck im Rezipienten beträchtlich sinkt; dann aber wird die Luft frei und der Druck im Stiefel überwiegt. Beim Durchgang elektrischer Entladungen steigt das Vakuum von selbst infolge Zersetzung des Öldampfes unter Ausscheidung von Kohle.

Da der Dampfdruck des Öls bei + 10° etwa 0,08 bis 0,05 mm Hg beträgt, läßt sich bei Verwendung von Öl natürlich auch durch die beste Pumpe kein niedrigeres Vakuum erzeugen. Die Firma beabsichtigt deshalb Ersatz des Öls durch geschmolzene feste Körper, deren Dämpfe kondensiert werden.


Fig. 2611.

Rotierende Ölluftpumpen (Hochvakuumpumpen) nach Fig. 2611 liefern die Siemens-Schuckert-Werke, Berlin SW., Askanischer Platz 3. Die innere Einrichtung entspricht der der Pumpen Fig. 2322, S. 788. Sie können direkt mit einem Elektromotor gekuppelt werden und laufen in einem ganz mit Öl gefüllten Kasten.

Auch die Firma Pfeiffer liefert eine rotierende Pumpe, doch stehen beide Konstruktionen bezüglich des erreichbaren Vakuums der Fleuß pumpe nach.

246. Quecksilberluftpumpen[1]. In der neueren Zeit werden für gewisse physikalische Zwecke, namentlich da, wo es sich um möglichst vollständige Entleerung

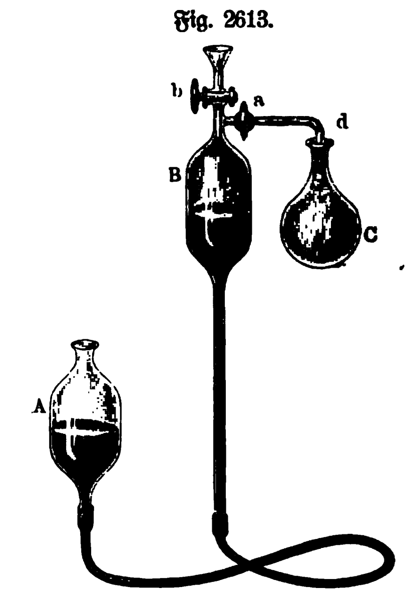
[1] Siehe auch Hellmann, Die Quecksilberluftpumpe in ihren wichtigsten Formen, (Riga 1885, Kymmel, 34 S., 3 Tafeln) und S. P. Thompson, Prakt. Physik, 1888.

handelt, vielfach Quecksilberluftpumpen angewendet[1]). Ihr Prinzip ist schon sehr alt und wurde bereits in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts von den Florentiner Akademikern benutzt. Im wesentlichen bestehen sie aus einem Gefäßbarometer, dessen Gefäß sich heben und senken läßt und dessen leerer Raum mit dem zu evakuierenden Gefäß und auch mit der Atmosphäre in Verbindung gesetzt werden kann, ersteres beim Senken, letzteres beim Heben des Gefäßes. Besondere Verdienste um die Verbesserung desselben hat sich namentlich um die Mitte des 19. Jahrhunderts der inzwischen verstorbene berühmte Glaskünstler Dr. H. Geißler in Bonn erworben, der mit Hilfe derselben die allbekannten Geißlerschen Röhren zur Beobachtung der elektrischen Entladungen im Vakuum anfertigte. Die Geißlersche Pumpe (Fig. 2612 K, 220) hat sich im Laufe der Zeit mit verschiedenen Verbesserungen (Alvergniat [langer Kautschukschlauch], Jolly [1875] [Kurbel zum Aufwinden des beweglichen Gefäßes]) in größeren physikalischen Laboratorien überall Eingang verschafft und der Wissenschaft

Fig. 2612.



Fig. 2613.



große Dienste geleistet; als Demonstrationsinstrument erscheint sie indes wenig geeignet, da sie sich nur schwer transportieren läßt und sehr zerbrechlich ist. Auf nähere Beschreibung der Konstruktion kann hier verzichtet werden, da man dieselbe, wenn nötig, in allen größeren Lehrbüchern findet[2]). Die Fig. 2613 zeigt schematisch

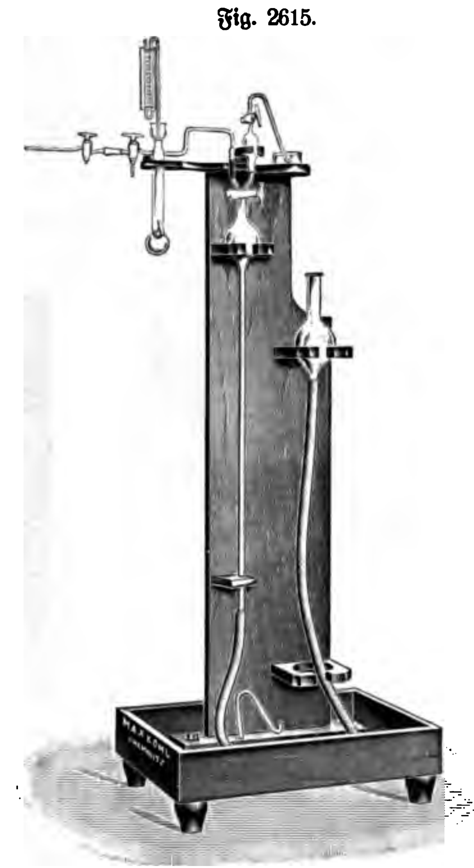
[1]) Bei größeren Rezipienten evakuiert man zunächst mit der gewöhnlichen Luftpumpe und dann erst mit der Quecksilberluftpumpe. — [2]) Diese Geißlersche Form der Pumpe ist zu beziehen von Franz Müller (Geißlers Nachf.) in Bonn a./Rh., Meckenheimerstraße 51, und kostet in bester Ausführung 140 bis 270 Mk., in einfacherer Konstruktion (für höhere Schulen bestimmt) 100 bis 150 Mk.

die Einrichtung. Das Gefäß *A* eines oben erweiterten Barometers *B* ist mit diesem durch einen biegsamen Schlauch verbunden, welcher gestattet, dasselbe in gleiche Höhe mit dem oberen Ende des Barometers zu bringen. An letzterem sind zwei Glashähne angeschmolzen, von welchen der eine, *b*, frei in die Luft mündet, der andere, *a*, durch Schliff *d* mit dem Rezipienten, etwa einer gefärbtes Gas, z. B. Brom, enthaltenden Glaskugel *C* in Verbindung steht. Wir schließen *a*, öffnen *b* und heben *A*, bis etwas Quecksilber in *C* ausfließt, also *B* sich vollständig gefüllt hat. Nun schließen wir *b*, senken *A*, bis es auf einem in der Figur nicht

Fig. 2614.



Fig. 2615.



gezeichneten Untersatze aufsteht und in *B* sich das Torricellische Vakuum gebildet hat. Nun öffnen wir Hahn *a*, so daß nunmehr das Gefäß *C* mit dem Vakuum *B* in Verbindung gesetzt ist. Man sieht sofort das gefärbte Gas nach *B* überströmen und sich (ohne Bildung einer scharfen Grenze) in dem leeren Raum fast momentan gleichförmig verteilen.

Schließt man weiterhin *a*, öffnet *b* und hebt abermals *A*, so wird der nach *B* übergegangene Teil des Gases durch *b* hinausgedrückt, und wir können ihn eventuell in irgend einem Gasbehälter, z. B. über der pneumatischen Wanne über Quecksilber auffangen. (Vgl. Fig. 2615.)

Wiederholen wir nun sämtliche Operationen, so wird abermals ein Teil des Gasinhaltes von *C* in den Behälter oder ins Freie hinausbefördert, und bald wird *C* fast seines ganzen Gasinhaltes beraubt sein.

Jolly hat die zerbrechlichen Glashähne durch Stahlhähne ersetzt, welche mit Siegellack aufgekittet werden. Dieselben sind indes weniger zuverlässig. Narr (1885) hat die Siegellackkittung dieser Hähne durch Flanschenverbindung mit Fettdichtung ersetzt.

Eine neuere Konstruktion ist die von Greiner und Friedrichs in Stützerbach in Thüringen, welche in Fig. 2614 und Fig. 2615 (K, 150) dargestellt ist. Eigentümlich ist hier die Form des Haupthahns, welcher zwei schräge Bohrungen hat. Hierdurch wird vermieden, daß sich eine Rille zwischen Hülse und Stopfen bildet, welche den Hahn undicht macht, wie dies bei Hähnen mit quer durchgehender Bohrung mit der Zeit und namentlich bei mangelnder Sorgfalt beim Gebrauch stets eintritt, da Staub, welcher sich an den Rändern der Bohrungen sammelt, beim Drehen des Hahnes als Schleifmittel wirkt. Bei den schräg gestellten Bohrungen entstehen zwar ebenfalls solche Rillen, dieselben stehen aber nicht miteinander in Verbindung, so daß die Luft, nicht aus der einen in die andere gelangend, den Hahnzapfen umgehen kann. Der Hahn ist ferner, wie die Figur zeigt, beiderseits mit Quecksilberdichtungen versehen, um Eindringen der Luft von außen ganz unmöglich zu machen. Das Arbeiten mit der Pumpe geschieht in folgender Weise. Man hebt das bewegliche Gefäß und stellt den Hahn so, daß Luft und etwas Quecksilber in das Gefäß *a* austreten. Hierauf dreht man den Hahn um 90° und senkt das bewegliche Gefäß, so daß sich im festen ein Vakuum herstellt. Nun dreht man den Hahn nochmals um 90°, wodurch vermittelst des Schliffes *b* die Verbindung mit dem Rezipienten hergestellt wird. Durch weitere Drehung um 90° wird der Hahn wieder geschlossen u. s. w.

Fig. 2617.

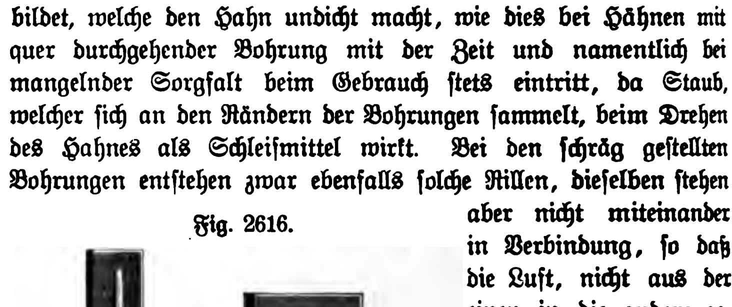
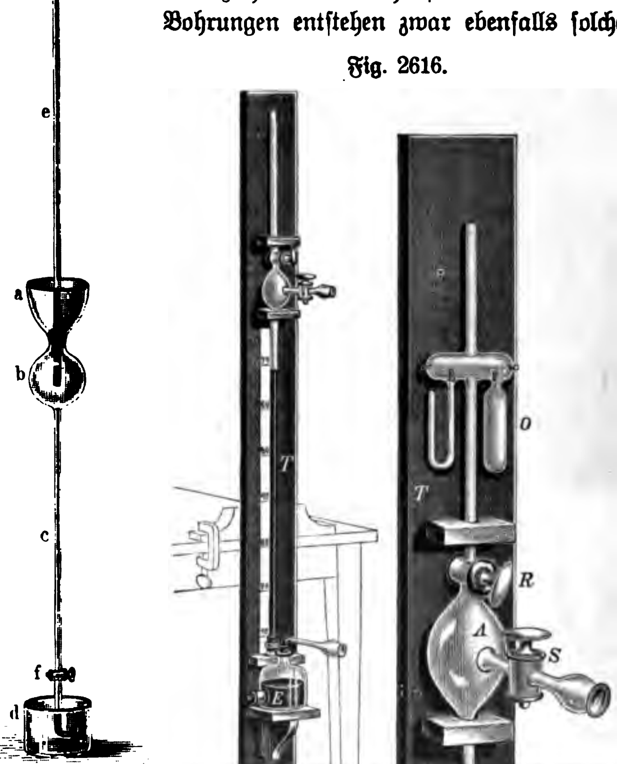


Fig. 2616.



Eine sehr einfache Form nach Albán (Z. 11, 151, 1898), Fig. 2616, bei welcher die Veränderung des Quecksilberstandes einfach durch Neigen des Apparates hervorgebracht wird, liefert Ernecke-Berlin zu 105 Mk.

Eine andere Vorrichtung zur Demonstration des Prinzips der Quecksilberluftpumpe mit geringen Mitteln wurde von Joule (1873) angegeben, Fig. 2617. Ein Trichterrohr von mehr als Barometerlänge ist dicht unterhalb des Trichters zu einer Kugel aufgeblasen und am Ende mit einem Hahn versehen. In den Trichter

kann mittels eines Stöpsels ein enges Glasrohr eingesteckt werden, welches mit dem zu evakuierenden Gefäße in Verbindung steht. Man füllt beim Gebrauche zuerst den Trichter mit Quecksilber, lüftet den Stöpsel, so daß sich die Kugel mit Quecksilber füllt, drückt den Stöpsel wieder fest und öffnet den Hahn. Es wird Luft in die Kugel eingesaugt. Hierauf wiederholt man die Operation.

Man hat in verschiedenster Weise gesucht, die Pumpe abzuändern und zu verbessern, doch würde es zu weit führen, diese Konstruktionen hier alle anzuführen[1]).

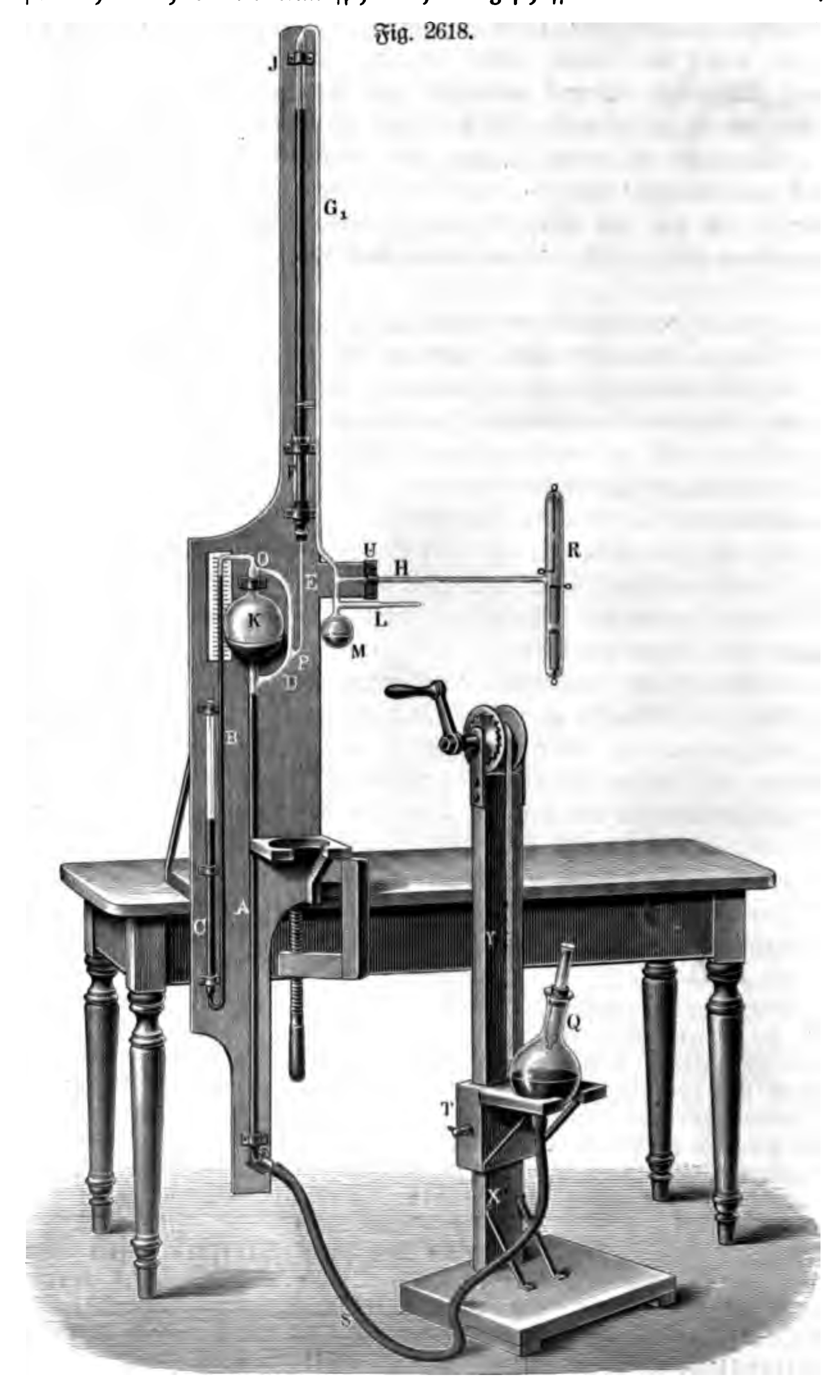
Als zweckmäßigste hat sich die Töplersche Pumpe nach Bessel-Hagen erwiesen[2]). Es sei hier kurz die von Töpler gegebene Gebrauchsanweisung wiedergegeben, welche zeigt, wie man mit derartigen Luftpumpen zu arbeiten hat, Fig. 2618.

„Hebt man das Quecksilberreservoir Q, so wird, sobald das Quecksilber im Rohre A bis zur Einmündungsstelle des zum Rezipienten führenden Rohres E gestiegen ist, die Kommunikation der Kugel K und des Rezipienten durch die im Rohre E aufsteigende Quecksilbersäule unterbrochen, während die in der Kugel K enthaltene Luft mehr und mehr zusammengepreßt in Blasen durch das im Auslaßrohre $B\,C$ befindliche Quecksilber entweichen wird. Hat man das Reservoir Q so weit gehoben, daß die ganze Kugel K etwa bis zur Höhe der Marke O mit Quecksilber gefüllt ist und entweichen bei C keine Luftblasen mehr, so wird das Gefäß Q gesenkt. Das Quecksilber fließt nun sofort aus der Kugel K und aus dem Steigrohre E wieder zurück, die Öffnung des letzteren wird frei und die im Rezipienten enthaltene Luft dringt durch das Rohr D in die Kugel K ein. Gleichzeitig steigt im Auslaßrohre B das Quecksilber aus C empor und ebenso aus der Wanne F in den zwischen dem Steigrohre E und dem übergestülpten Rohre G bleibenden Zwischenraum und zwar bis zu einer Höhe, welche dem Unterschiede der Spannung der Atmosphäre und der im Rezipienten enthaltenen Luft entspricht. Ist das Quecksilber aus der Kugel K bis unter die Höhe der Ansatzstelle des Rohres E gefallen, so wird das Quecksilbergefäß Q wieder gehoben, somit durch die im Inneren der Steigröhre E aufsteigende Quecksilbersäule die Verbindung der Pumpenkugel K mit dem Rezipienten wieder unterbrochen, die Spannung der Luft in K wächst, die Quecksilbersäule in B fällt, bis schließlich, analog wie vorher, wieder ein Teil der

[1]) Einige derselben mögen kurz aufgezählt werden: Töpler (1862) (Pumpe ohne Hähne); G. Manuelli (zwei Quecksilberpumpen kombiniert); Morren (1865?) (Gelenk aus Kautschuk, eiserne Hähne); Poggendorff (1865) (Kombination von gewöhnlicher Luftpumpe und Quecksilberpumpe); v. Babo (Ventilquecksilberpumpe); Busch (1869?) (alle Verbindungen unter Quecksilber abgeschlossen); Joule (1873) (einfacher Demonstrationsapparat); A. Mitscherlich (1873) (Ventilquecksilberluftpumpe); Weinhold (1873) (das bewegliche Gefäß wird luftleer gemacht, um das Übertreten von Luft durch den Kautschukschlauch zu hindern); Las Marismas (1874) (doppeltwirkende Pumpe ohne Hähne); Mendelejew (1874) (Quecksilberpumpe ohne Hahn); Dubois (1877) (Pumpe ohne Hahn); Couttolenc (1880) (Pumpe ohne Hahn); Bessel-Hagen (1881) (verbesserte Töplersche Pumpe); Neesen (1882) (Ventilquecksilberpumpe); Serravalle (1882) (doppeltwirkende Pumpe mit automatischer Hahnregulierung); Goebel u. Kulm-Kamp (1882) (Ventilpumpe mit zwei Schläuchen); Bock (1883) (Pumpe ohne Schlauch); Guglielmo (1884) (Zwischenform zwischen der Geißlerschen und Töplerschen Pumpe); Sundell (1884) (verbesserte Hagensche Pumpe); Karawodin (1884) (verbesserte Hagensche Pumpe). Spätere s. S. 585 u. ff. — [2]) Eine ausführliche Beschreibung findet man in Wiedemanns Annalen der Physik 12, S. 425 u. ff., 1881. Sie ist zu beziehen von dem Glaskünstler Florenz Müller, Berlin NW., Marienstr. 4, zum Preise von 140 Mk.

im Rezipienten zuvor enthaltenen Luft durch das im Abschlußrohre *C* befindliche Quecksilber hindurch in die Atmosphäre hinausgeschafft wird. Man bemerkt, daß

Fig. 2618.



von *C* aus die einmal hinausgeschaffte Luft nie wieder in den Apparat dringen kann, da das Rohr *C* länger ist, als die Höhe der barometrischen Quecksilbersäule

Diese Art des Pumpens wird so lange fortgesetzt, bis bei C keine oder nur noch unbedeutende Luftblasen entweichen. Es bleibt dabei das Auslaßrohr B mit Luft gefüllt, deren Spannung gleich ist der der Atmosphäre, vermehrt um die kleine Quecksilbersäule, um welche alsdann in C das Quecksilber höher steht als in B. Diese das Rohr B erfüllende Luftmenge entspricht der bei den gewöhnlichen Luftpumpen im sogenannten schädlichen Raume zurückgebliebenen. Indes, um diese zu eliminieren, braucht man beim weiteren Pumpen das Gefäß Q nur noch langsam (zu rasche Bewegung zertrümmert die Pumpe) höher und zwar so weit zu heben, bis das Quecksilber aus der Pumpenkugel K in das Auslaßrohr B selbst tritt und beim Überfließen die in diesem zurückgebliebene Luft vor sich herschiebend durch das Rohr C in die äußere Atmosphäre treibt. Bringt man hiernach das Quecksilbergefäß Q wieder in seine tiefste Stellung, so wird über dem Quecksilber in der Kugel K sich eine Toricellische Leere bilden, in welche dann die im Rezipienten noch enthaltene Luft hinein expandiert, sobald die Mündung des Rohres E frei wird. Das bei dieser Art des Pumpens aus dem Reservoir Q nach C hinübergeflossene Quecksilber hat zur Folge, daß nun die Höhendifferenz zwischen dem Niveau des Quecksilbers im Abschlußrohre C und dem höchsten Punkte des Rohres B kleiner geworden ist, als die Länge der barometrischen Quecksilbersäule, und es schafft daher der Atmosphärendruck das nach C übergeführte Quecksilber selbsttätig wieder zurück, bis die erwähnte Höhendifferenz wieder gleich der Länge der barometrischen Quecksilbersäule geworden ist."

Nach Bessel-Hagen sind die erreichbaren Verdünnungsgrade[1]) bezw. Niveaudifferenzen des Quecksilbers der Barometerprobe (die sich natürlich nur auf indirektem Wege mittels des Mc Leodschen Manometers messen lassen):

bei der Geißlerschen Pumpe älterer Konstruktion	. . . .	0,11 mm
„ „ „ „ neuerer „	. . . .	0,0085 mm
„ „ nach Hagen verbesserten Töplerschen Pumpe	. .	0,000012 mm.

Es ist hierbei wohl zu berücksichtigen, daß die Niveaudifferenz der Barometerprobe nicht den wahren Druck im Rezipienten, sondern nur den Partialdruck der verdünnten Luft repräsentiert, insofern der Druck des vorhandenen Quecksilberdampfes, welcher in beiden Schenkeln der Barometerprobe in gleicher Stärke wirkt, nicht mit gemessen wird. Es ist also, um den wahren Druck zu erhalten, zu obigen Zahlen noch der Druck des Quecksilberdampfes bei der betreffenden Temperatur hinzuzuzählen.

Derselbe beträgt bei

0°	0,0148 mm
20°	0,0201 „

Um auch den Quecksilberdampf möglichst zu beseitigen, hat Crookes (1881) Röhren mit Schwefel benutzt. Hagen bringt zu diesem Zwecke Blattgold in Vorschlag, welches sich allmählich mit den Quecksilberdämpfen amalgamiert. Nach den Versuchen von Warburg und Ihmori dürfte sich eher Blattsilber eignen. Ganz besondere Achtsamkeit muß man beim Experimentieren mit Quecksilberpumpen darauf verwenden, daß nicht die geringste Spur von Feuchtigkeit in dieselben hineingelangt; es müssen somit nicht nur vor dem Zusammensetzen alle Teile möglichst sorgfältig getrocknet werden, sondern man muß auch dafür sorgen, daß keine feuchte

[1]) Siehe auch S. 588 u. 589, Kahlbaums Pumpe.

Luft beim Pumpen in die Pumpe hinein gelangen kann. Die Zuleitungsröhre muß somit ein Gefäß enthalten, welches wasserfreie Phosphorsäure enthält, so daß das Gas auf großer Fläche mit derselben in Berührung kommt (vergl. S. 930, Trockenapparat von Reiff). Durch einen Stopfen aus Baumwolle oder Glaswolle kann das Mitreißen von Phosphorsäurestaub verhindert werden.

Fig. 2619.

Übrigens haftet auf Glasflächen eine Luft- oder Wasserdampfschicht, die selbst nicht im Vakuum, ja nicht einmal bei gleichzeitiger Erhitzung auf 300°, zu entfernen ist. Erst bei tagelanger Erhitzung im Vakuum löst

Fig. 2620.



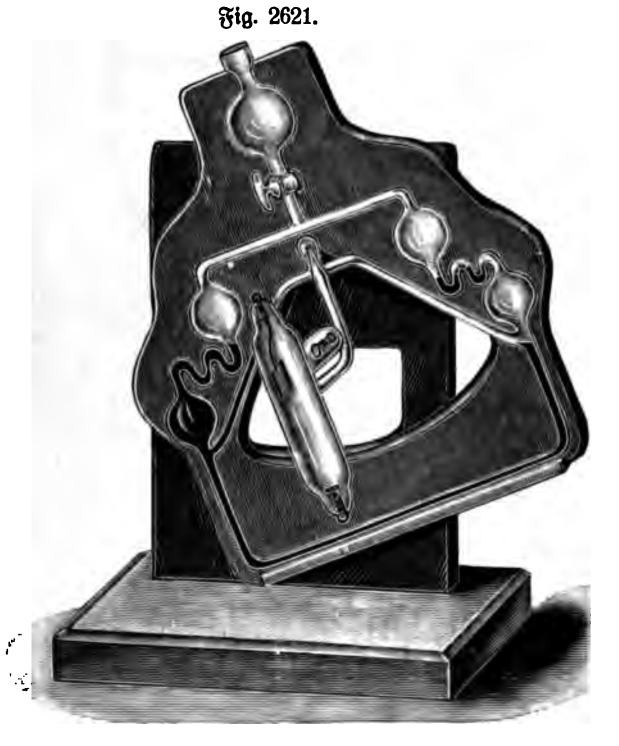
sich dieselbe allmählich, noch sicherer beim Durchgang von elektrischen Entladungen durch das evakuierte Gefäß [1]).

[1]) Hiermit dürfte eine von dem Herausgeber beobachtete Erscheinung zusammenhängen, daß ein neu hergestelltes evakuiertes Rohr (ohne Elektroden) in der Nähe einer funkengebenden Elektrisiermaschine völlig dunkel bleibt, wenn dagegen einmal durch eine besonders heftige elektrische Einwirkung von außen im Inneren Leuchten eingetreten ist, dasselbe nun ganz regelmäßig eintritt, sobald das Rohr der Elektrisiermaschine genähert wird. (Wied. Ann. 22, S. 341, 1884.) Eine kompendiöse Form der Pumpe zeigt Fig. 2619 (Lb, 225).

Die in Fig. 2620 (E, 110) dargestellte Pumpe von P. Spies (Z. 8, 363, 1895) eignet sich zum Gebrauch neben einer Geryk luftpumpe, mit welcher zunächst durch den links sichtbaren dickwandigen Schlauch das ganze System evakuiert wird. Sie erfordert nur ein halbes Liter Quecksilber, kann auch leicht von einer einzigen Person transportiert werden.

Kravogl suchte die Unbequemlichkeit der Hebung des Gefäßes durch den Kurbelmechanismus zu umgehen durch Benutzung einer Pumpe mit eisernem Kolben. Zweckmäßiger ist die Anwendung des Luftdrucks unter Vermittelung einer Wasserluftpumpe oder anderen mechanisch betriebenen Pumpe, wodurch, wie z. B. bei der Rapsschen Pumpe, Fig. 1909, deren Beschreibung schon auf S. 586 gegeben wurde, der Betrieb automatisch gemacht werden kann.

Fig. 2621.



Eine einfache doppeltwirkende Pumpe nach Wood (Fig. 2621) liefert Reinhold Burger, Berlin N., Chausseestraße 2 E. Sie ist nur in solchen Fällen zu gebrauchen, wenn ein bereits hergestelltes, aber im Laufe der Zeit schlechter gewordenes Vakuum wieder verbessert werden soll und ist in diesem Falle ihrer geringen Dimensionen wegen handlicher und leichter transportabel als eine normale Pumpe. (Preis 25 Mk.)

Eine neue automatisch wirkende Quecksilberluftpumpe nach Bodenburg ist in Fig. 2622 dargestellt[1]). Die Wirkungsweise ist folgende: Mit Hilfe einer Vorpumpe (Wasserstrahlpumpe) wird durch das Schlauchansatzstück *a* Luft aus dem Quecksilberreservoir *R* angesaugt, welches durch das Lippenventil *b* und das in den Schliff *d* eingeschmolzene Glasrohr *c* mit der Kugel *K* in Verbindung steht. Die Kugel *K* wiederum steht durch die Schlauchverbindung *e*, die Luftfalle *f* und das Kapillarrohr *g* in Verbindung mit dem Pumpenkörper *P* und durch diesen schließlich in Verbindung mit dem leerzupumpenden Rezipienten. Die Vorpumpe wird also die Quecksilberpumpe und den Rezipienten zuvor auf eine gewisse Luftverdünnung bringen, welche der Leistungsfähigkeit der ersteren entspricht (etwa 10 mm Quecksilbersäule).

An das System sind ferner angeschlossen die beiden Steigrohre *h* und *i*, in welchen, entsprechend der fortschreitenden Luftverdünnung in *R*, aus dem tiefer gelegenen Gefäße *G* Quecksilber aufsteigt. Die Länge des kürzeren Glasrohres *h*

[1]) Zu beziehen von Richard Müller-Uri, Braunschweig, zu 280 Mk.

Fig. 2622.

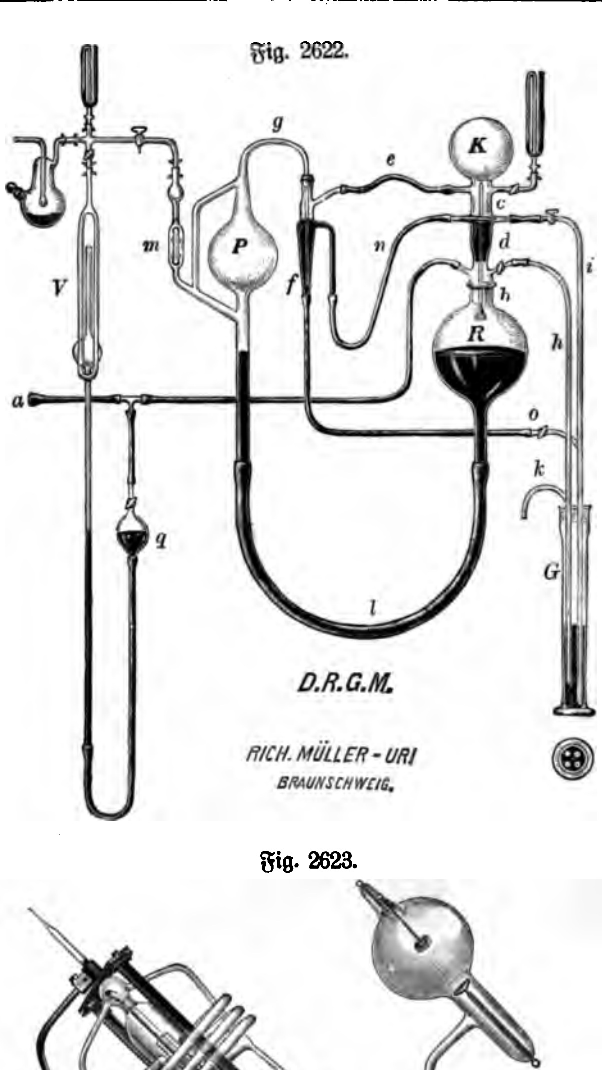
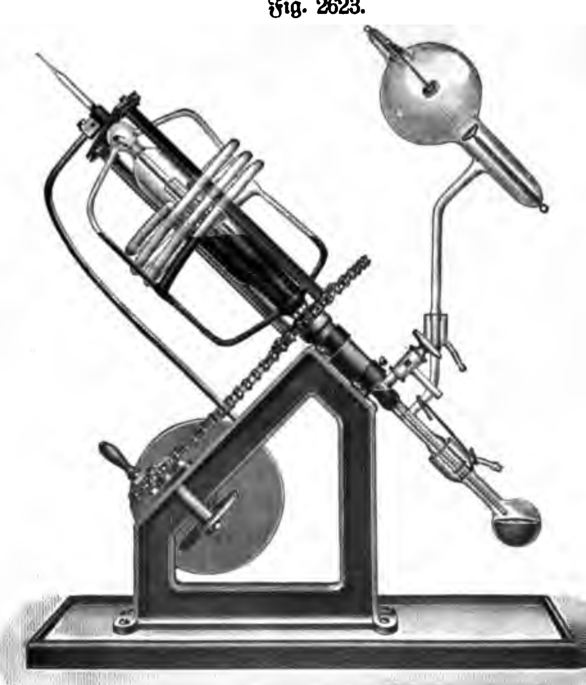


Fig. 2623.

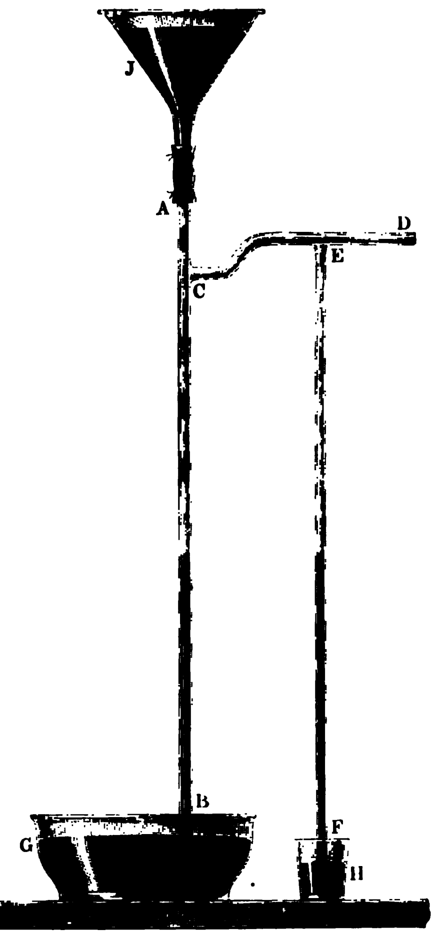


entspricht der Förderhöhe, welche die Vorpumpe zu leisten vermag. Der Atmosphärendruck, welcher durch das Röhrchen *k* auf das Quecksilber im Gefäße *G* drücken kann, wird dieses in das Reservoir *R* hinüber entleeren. Hierdurch wird zuletzt die untere Öffnung des Standrohres *h* freigelegt, sodaß Luft in das Reservoir einströmen kann. Der hierdurch erzeugte Überdruck schließt das Lippenventil *b*, sodaß die Kugel *K* ihr Vakuum behält, und das Quecksilber des Reservoirs wird durch den Schlauch *l* im Pumpenkörper *P* hochgetrieben. Beim Aufsteigen des Quecksilbers schließt dieses das Schwimmerventil *m*, während die im Pumpenkörper *P* befindliche Luft durch das Kapillarrohr *g* in die Luftfalle getrieben wird, von wo aus sie durch den Schlauch *e* in die noch evakuierte Kugel *K* entweichen kann. Das nachdrängende Quecksilber füllt die Luftfalle *f* aus und fließt durch die Schlauchleitung *n* in den Hohlschliff *d* und von dort durch das Rohr *i* in das Gefäß *G*. Das Quecksilberniveau in *G* steigt und verschließt dabei die untere Öffnung von *h*. Sofort gewinnt die Saugwirkung der Vorpumpe wieder die Überhand und das Quecksilber sinkt in *P* langsam zurück bis sich der Druckausgleich zwischen *P* und Rezipient vollzogen hat.

Inzwischen hat sich *G* durch Rohr *h* wieder nach *R* entleert und mit dem Einströmen von Luft nach *R* beginnt das neue Spiel. Der Hahn *o* hat den Zweck, vor Anstellen der Pumpe das Quecksilber aus der Luftfalle *f* abzulassen, um das anfängliche Schlagen der Luftblasen zu vermeiden.

Zur dauernden Kontrolle des fortschreitenden Vakuums ist mit der Pumpe ein Präzisions-Manometer *V* der Mac Leodschen Art so in Verbindung gebracht, daß das Quecksilberreservoir *q* desselben gleichfalls wie *R* periodischen Druckschwankungen unterworfen wird, wodurch bei jedem Hube das Quecksilber zur vergleichenden Ablesung im Manometer hochgetrieben wird.

Fig. 2624.



Man hat auch rotierende Quecksilberluftpumpen konstruiert[1]). W. Kaufmann empfiehlt die in Fig. 2623 dargestellte Form[2]). Sie hat vor anderen Pumpen gleicher Wirksamkeit den Vorteil äußerst geringer Dimensionen und geringen Quecksilberbedarfs (200 bis 250 ccm). Da die ausgetriebene Luft nicht komprimiert wird, entsteht keine Gefährdung der Glasteile durch Quecksilberschläge und die Wirkung bleibt gleich vollkommen bis zu den höchsten Verdünnungen. Wenn der Druck im Apparat unter 1 mm gesunken ist, kann man die Wasserluftpumpe abstellen und die Pumpe beliebig transportieren. Sie kann von Hand oder durch einen Elektromotor betrieben werden. Der Betrieb kann jederzeit ohne weiteres unterbrochen und später, eventuell nach Wochen, ebenso ohne weiteres wieder aufgenommen werden. Das Quecksilber kommt nur mit Glas in Berührung, bleibt also vollkommen rein.

247. Tropf- oder Fallrohr-Pumpen. Als Kolben wirken hier fallende Tropfen, die sich an die Wände der „Fallröhre" anschließen.

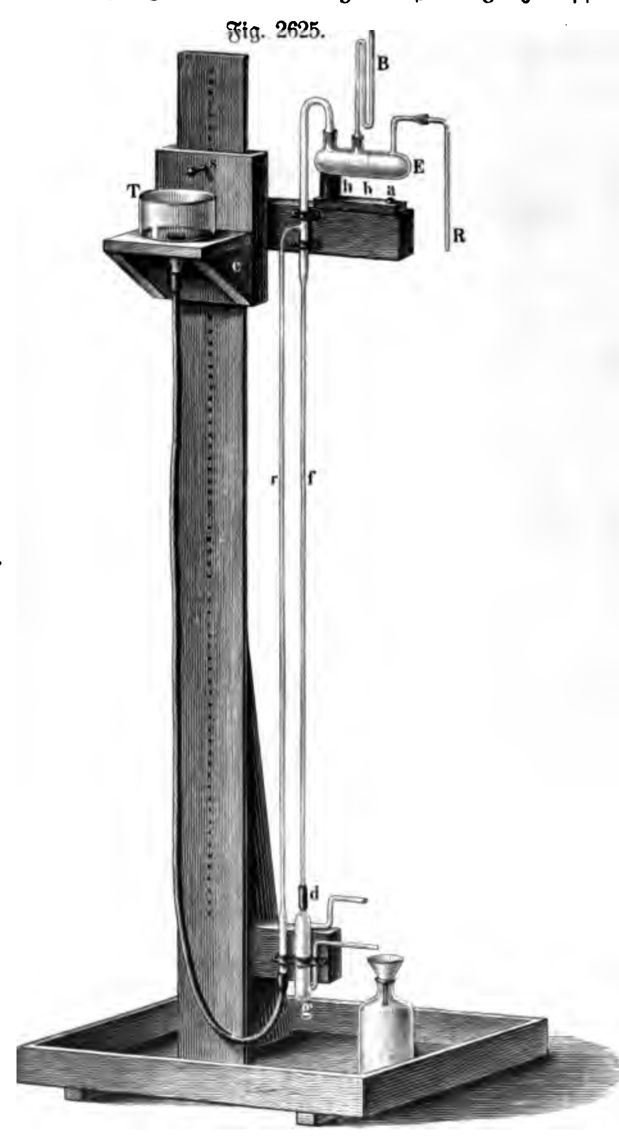
Sprengels Luftpumpe. An den Trichter *J* (Fig. 2624) ist durch eine Kautschukröhre, die durch einen Quetschhahn geschlossen werden kann, die etwa 3 mm weite Barometerröhre *AB* befestigt, welche in das Quecksilbergefäß *G* taucht. Die Röhre *AB* muß zwischen *C* und *B* über 76 cm lang sein; sie ist unten aufgebogen und man kann über ihrer Öffnung die ausgepumpten Gase über Quecksilber auffangen. Das Kautschukstück muß besonders gut schließen (sogenannter schwarzer Kautschuk wird genommen), und es muß auch noch an Trichter und Röhre nicht

---

[1]) Eine Quecksilber-Spiralluftpumpe beschreiben Fritsche u. Pischon (in Berlin) in der Zeitschr. f. Instrumentenkunde 11, 38, 1890 (vgl. S. 785, Fig. 2316). — [2]) Zu beziehen von Fr. Müller (Geißlers Nachf.), Bonn, beschrieben a. a. O. 25, 129, 1905.

nur angebunden, sondern noch durch Guttapercha (Marineleim) angekittet werden. An AB ist das Rohr CD gelötet, welches zu dem Rezipienten führt und noch das engere Barometerrohr EF trägt; dieses ist mit einer Skala versehen und dient zur Bemessung der Verdünnung. Daß der ganze Apparat, namentlich aber der Trichter, an einem festen Gestelle anzubringen sei, ist wohl selbstverständlich [1]). Indessen ist diese Luftpumpe nur für kleine zu entleerende Gefäße geeignet (Geißlersche Röhren, elektrische Glühlampen).

Fig. 2625.



Ein Nachteil der in der Figur abgebildeten einfachen Konstruktion insbesondere ist der, daß die Kautschukverbindung zwischen Trichter und Fallrohr nicht ganz zuverlässig dicht hält und daß das herabfallende Quecksilber immer Luft mitführt, da stets zwischen Glas und Quecksilber eine dünne Luftschicht bleibt, die in dem Maße, als das Quecksilber herabsinkt, mit nach unten geschoben wird und sich oben immer aufs Neue ergänzt.

Eine wesentliche Verbesserung erfuhr die Sprengelsche Pumpe durch Gimingham [2]) (1877).

Derselbe bringt den Trichter an einem langen Kautschukschlauch an, so daß er sich wie das bewegliche Gefäß einer gewöhnlichen Luftpumpe heben und senken läßt. Dieser Schlauch ist verbunden mit einer der Fallröhre parallelen Glasröhre, welche mit letzterer am oberen Ende verbunden ist, aber nicht durch Kautschuk, sondern durch ein eigentümliches Glasverbindungsstück mit „Luftfalle“ und „Vakuumzapfen“ beziehungsweise „Schwefelsäurezapfen“. Das Quecksilber bewegt sich also zuerst durch den Kautschukschlauch abwärts, dann durch die genannte Röhre aufwärts und gelangt nun erst in die Fallröhre bezw. in die Fallröhren, da Gimingham deren drei nebeneinander

[1]) Weinhold benutzt die Sprengelpumpe in der in Fig. 2625 (K, 195) dargestellten Form. — [2]) Ein ausführliches Referat hierüber nebst Figur findet man in Wied. Beibl. 1877, S. 175 u. ff.

anordnet. Das Gefäß, in welchem sich das herabgefallene Quecksilber ansammelt, ist in Verbindung gesetzt mit dem beweglichen Gefäß, so daß man nach Senken des Gefäßes und Öffnen eines Quetschhahns das Quecksilber in das bewegliche Gefäß ohne weiteres zurückfließen lassen kann. So lange das Gefäß gesenkt ist, funktioniert die Pumpe nicht, es kann aber auch nicht Luft eintreten, der aufsteigenden Röhre halber, welche dann mit der Fallröhre ein Doppelbarometer bildet. Zur Messung des Druckes ist die Pumpe ferner mit dem Apparate von Mc Leod verbunden, bezüglich dessen auf das weiter unten (S. 998) Gesagte verwiesen werden muß. Was die Leistungsfähigkeit der Pumpe anbelangt, so wird sie durch die Töpler-Hagensche Pumpe noch etwas übertroffen. Es rührt dies namentlich daher, daß trotz aller Sicherheitsvorkehrungen das Quecksilber doch noch etwas Luft in die Fallröhre mitbringt. Macaluso (1879) versuchte den Übelstand zu beseitigen durch Ersetzung des Kautschukschlauchs durch eine Glasröhre, welche die Röhre, in der das Quecksilber aufsteigt, umgibt und unten geschlossen ist.

Stearn und Sevan (1877) haben beide Quecksilberbehälter abgeschlossen, so daß die atmosphärische Luft gar keinen Zutritt zu denselben hat. Dadurch wird gleichzeitig der weitere Vorteil erzielt, daß die Fallröhre wesentlich kürzer wird (etwa 30 cm). Beim Gebrauch der Pumpe wird der obere Quecksilberbehälter vollständig gefüllt und mit einem Stöpsel geschlossen. Nun wird der untere Behälter mittels einer gewöhnlichen Luftpumpe evakuiert. Das Quecksilber beginnt bald zu fließen und damit ist der Apparat in stand gesetzt.

Mit dem besten Erfolge konstruierte Rood (1880) die Pumpe derart, daß das Quecksilber, ehe es in die Fallröhre tritt, eine Kugel passiert, die selbst möglichst luftleer gemacht wird. Zur Verbindung einzelner Teile benutzt er einen Kitt aus geschmolzenem Burgunderpech und 3 bis 4 Proz. Guttapercha, dessen vortreffliche Eigenschaften er besonders hervorhebt. Das höchste Vakuum, welches er mit seiner Pumpe erreichte, beträgt angeblich 0,000007 mm. Selbstverständlich muß vor dem Gebrauch sorgfältigst alle Feuchtigkeit aus dem Apparat entfernt werden, auch die auf den Glasflächen haftende Luft- oder Wasserdampfschicht, zu deren Beseitigung er elektrische Entladungen verwendet[1]).

Eine recht sinnreiche Verbindung von Wasser- und Quecksilberluftpumpe nach Sprengelschem Prinzip hat v. Babo (1879) konstruiert. (Siehe Wied. Beibl. 1879, S. 738.) Dieselbe ist leider etwas zerbrechlich und hat noch den weiteren Nachteil, daß das Quecksilber mit den Wasserdämpfen der Wasserluftpumpe in Berührung kommt, so daß sie also nicht dazu dienen kann, die äußersten Grade der Verdünnung herzustellen[2]).

Verschiedene neuere automatische Sprengelpumpen wurden bereits auf S. 587 u. ff. beschrieben[3]).

---

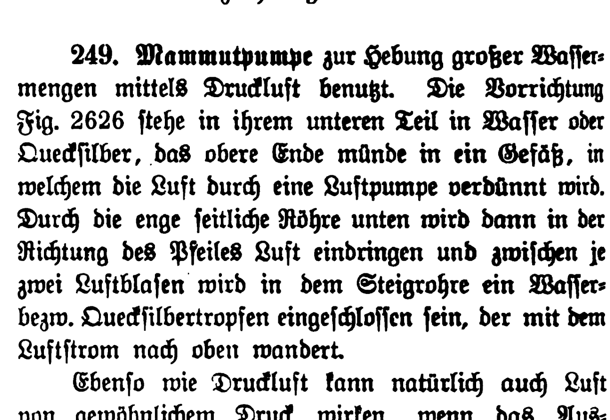
[1]) Über eine Pumpe, welche eine Kombination von Kugel- und Fallrohrpumpe darstellt und von Greiner und Friedrichs in Stützerbach zu beziehen ist, siehe Deutsche Mechanikerztg. 1898, S. 21. — [2]) Zu beziehen von Glaskünstler Carl Kramer in Freiburg i. B. Über eine andere selbsttätige Sprengelsche Pumpe von Verneuil (1891) siehe Beiblätter 1892, S. 7. — [3]) Bezugsquellen von Quecksilberluftpumpen sind: Greiner und Friedrichs, Glasinstrumentenfabrik, Stützerbach (Thür.). Heintz u. Co., Glasbläserei und mech. Werkstätte, Aachen, Vincenzstr. 15. Carl Kramer, Glasinstrumentenfabrik, Freiburg i. B., Friedrichstr. 15. W. Niehls, Glasinstrumentenfabrik, Berlin N., Schönhauserallee 168. Warmbrunn, Quilitz u. Co., Glasbläserei und mech. Werkstätte, Berlin NW. 40, Haidestr. 55 bis 57. Ed. Wiegand, Optiker, Dresden, Wallstr. 2. A. Eberhard (vorm. R. Nippe), Berlin NW., Platz vor dem Neuen Tor 1a. (Vgl. ferner S. 586 u. ff.)

Rosenthal[1]) empfiehlt besonders die Kahlbaumsche Pumpe, speziell die Modifikation nach Donle, welche ermöglicht, den gefetteten Hahn durch Quecksilberverschluß von der Pumpe abzutrennen und dadurch das Eindringen von Fettdämpfen in die evakuierten Teile zu hindern. Er brachte verschiedene Verbesserungen an derselben an, unter welchen namentlich hervorzuheben ist die Isolierung der gläsernen Fallröhre durch Umgeben mit Öl, wodurch die elektrischen Entladungen zwischen Glas und Quecksilber, die sonst zu rascher Zerstörung der Fallröhre führen, beseitigt werden[2]).

248. **Wassertropfluftpumpen** (Fig. 31, S. 33, Lb, 7) erfordern eine mindestens 10 m lange Abflußröhre und erzeugen ein Vakuum von nur etwa 20 mm entsprechend der Tension des Wasserdampfes bei der betreffenden Temperatur. Sie arbeiten naturgemäß auch nur langsam.

Bei den selbsttätigen Sprengelpumpen findet auch eine Art Umkehrung des gleichen Prinzips Anwendung, insofern nicht durch Quecksilbertropfen Luft, sondern umgekehrt durch Luft Quecksilbertropfen mitgenommen und nach oben befördert werden. Dasselbe Prinzip wird unter der Bezeichnung

Fig. 2626.



249. **Mammutpumpe** zur Hebung großer Wassermengen mittels Druckluft benutzt. Die Vorrichtung Fig. 2626 stehe in ihrem unteren Teil in Wasser oder Quecksilber, das obere Ende münde in ein Gefäß, in welchem die Luft durch eine Luftpumpe verdünnt wird. Durch die enge seitliche Röhre unten wird dann in der Richtung des Pfeiles Luft eindringen und zwischen je zwei Luftblasen wird in dem Steigrohre ein Wasser- bezw. Quecksilbertropfen eingeschlossen sein, der mit dem Luftstrom nach oben wandert.

Ebenso wie Druckluft kann natürlich auch Luft von gewöhnlichem Druck wirken, wenn das Ausströmungsrohr in einen Behälter mündet, in welchem die Luft etwa mit einer gewöhnlichen Luftpumpe oder Wasserluftpumpe verdünnt ist.

250. **Quecksilbervakuummeter.** Zur Beurteilung der Funktion der Luftpumpe kann man wie bei Fig. 2536 verfahren, d. h. Quecksilber in einer vertikalen Röhre heraufsaugen und die Steighöhe messen. Beispielsweise kann man beim Gebrauch der gewöhnlichen Luftpumpe mit einem Ansatzrohre eine gekrümmte, an 90 cm lange Glasröhre verbinden, welche über den Tisch hinab in ein Gefäß mit Quecksilber reicht, wie Fig. 2627 für eine Luftpumpe mit Teller zeigt[3]).

[1]) Rosenthal, Ber. d. d. phys. Ges. 2, 262, 1904. — [2]) Derartige Pumpen liefert die Polyphos-Gesellschaft in München. — [3]) Ein für technische Zwecke bestimmtes Vakuummeter dieser Art nach Fig. 2628 ist zu beziehen von Rich. Grabenwitz, Apparatebauanstalt, Berlin.

Diese Art der Messung hat die Unbequemlichkeit, daß man außerdem den Barometerstand bestimmen muß. Erleichtert ist diese Vergleichung bei dem Quecksilbervakuummeter nach Frerichs[1]) (Fig. 2629). Dasselbe besteht aus zwei getrennten, in ein gemeinsames Quecksilbergefäß eintauchenden Barometerröhren, von welchen die eine oben geschlossen, die andere zur Verbindung mit dem zu evakuierenden Raum oben offen und abgebogen ist. Die zwischen diesen beiden Rohren befindliche, in Millimeter geteilte versilberte Skala ist durch Zahn und Trieb verstellbar, so daß man den Nullpunkt derselben je nach dem wechselnden Barometerstand jedesmal auf den Quecksilberspiegel einstellen kann. Das in dem abgebogenen Rohre aufsteigende Quecksilber gestattet sodann, den erreichten Druck in Millimetern direkt abzulesen.

Bequemer verbindet man beide Röhren am unteren Ende, wodurch das Instrument vom Luftdruck unabhängig wird. Es verwandelt sich dadurch in eine Barometerprobe, welche gewöhnlich, da man nur geringe Druckdifferenzen zu messen hat, nicht in voller Barometerhöhe hergestellt wird (Fig. 2630 Lb, 6). Das Instrument hat allerdings nun den Nachteil, daß keine starken Druckschwankungen auftreten dürfen, da sonst durch den harten Stoß des Quecksilbers gegen das geschlossene Ende dieses zertrümmert wird[2]).

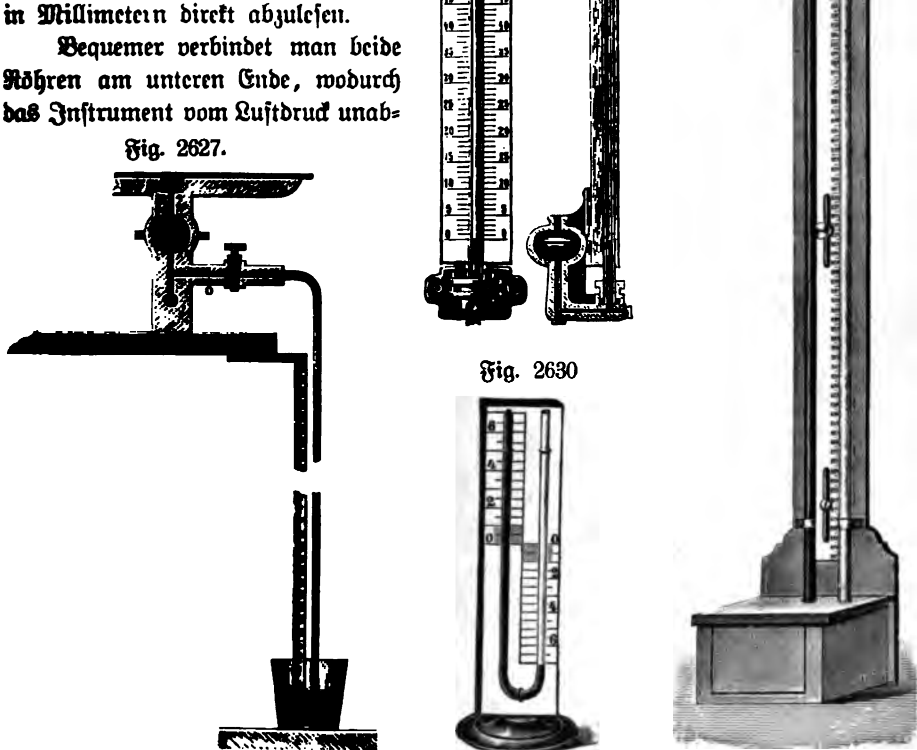


Fig. 2627.

Fig. 2628.

Fig. 2629.

Fig. 2630

[1]) Zu beziehen von Dr. H. Geißlers Nachf., Franz Müller in Bonn, zu 60 Mk. — [2]) Da die gewöhnlichen Barometerproben aus der Entfernung nicht sichtbar sind, habe ich von Staudingers Nachf. in Gießen zur Verbindung mit der Vakuumleitung (S. 135) eine sehr weite Barometerprobe auf besonderem Stativ herstellen lassen.

251. Barometer im Vakuum. Ein instruktiver Versuch ist das Fallen des Barometers unter dem Rezipienten der Luftpumpe beim Evakuieren. Man verfertigt sich für diesen Versuch einen hohen engen Rezipienten, Fig. 2631, aus einem gläsernen Trichter und einer mit dem Rohre des Trichters ungefähr gleich weiten, einerseits zugeschmolzenen Glasröhre, welche in einen einige Centimeter langen Ring von Blech so tief hinein gekittet werden, daß Glas an Glas steht. Der Trichter wird unten eben geschliffen. Als Barometer kommt darunter eine Torricellische Röhre ohne Skale, die man durch Kork in ein kleines Gläschen voll Quecksilber steckt, Fig. 2632. Das Quecksilber wird bis auf das Nötigste aus dem Gläschen aus-ausgegossen, bevor man den vorher an die Röhre gesteckten Pfropf in die Öffnung schiebt, damit beim Sinken des Barometers das Quecksilber aus der Röhre gehörig Raum finde, weswegen diese nicht zu weit sein darf. Man nimmt eine neue, noch sehr reine Glasröhre dazu, und läßt dann den Apparat für diesen Versuch beisammen. Der Pfropf muß für den Luftzutritt einen seitlichen Einschnitt haben. Eine andere ebenfalls empfehlenswerte Form dieses Apparates zeigt Fig. 2633, wobei auf die oben mit einem Halse versehene Luftpumpenglocke eine metallene Fassung mit zwei Hülsen gekittet ist; in die eine Hülse ist ein gewöhnliches Gefäßbarometer gekittet, in die andere ein doppelt gebogenes Rohr mit Quecksilbergefäß. Wird die Luft verdünnt, so steigt das Quecksilber in der letzteren Röhre, während es im Barometer sinkt. Auch hier muß man beim Wiederzulassen der Luft vorsichtig sein.

Fig. 2631. (1/10)

Fig. 2632.

Fig. 2633.

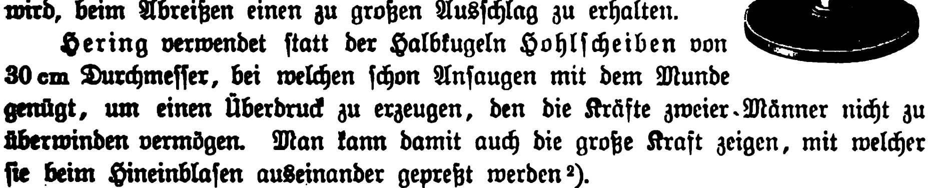
Fig. 2634.



Da ein Heber als Doppelbarometer aufgefaßt werden kann, so ist natürlich, daß er im luftverdünnten Raume nicht fließt. Dieser Versuch läßt sich nur mit Quecksilber sicher anstellen. Man biegt dazu aus einer Thermometerröhre einen Heber, wie ihn Fig. 2634 zeigt; er hat bei *o* eine kleine Öffnung, die beim Ansaugen mit dem Finger verschlossen wird. Das Quecksilber kommt in einen etwas hohen Cylinder und das ausfließende Quecksilber wird in einem daneben gesetzten weiteren Gefäße aufgefangen. Wenn der Heber fließt, bedeckt man den Apparat mit einer nicht zu großen Glocke und zieht aus; sobald die Luft gehörig verdünnt ist, hört der Heber auf zu fließen.

252. Wirkungen des Luftdrucks. 1) Die Magdeburger Halbkugeln (Fig. 2635 Lb, 16). Man stellt den Versuch mit ihnen am besten so an, daß man mittels eines Hakens an den Halbkugeln ein Gewicht hebt, das nicht imstande ist, dieselben auseinander zu reißen, dessen Größe also vorher ermittelt wird [1]). Durch Leute an den Halbkugeln zerren zu lassen, ist zu umständlich und gibt am Ende doch keine so deutliche Anschauung, auch kann es beim plötzlichen Losgehen der Halbkugeln zu Verletzungen der Leute führen, da sie auf den Rücken fallen. Die gut aufeinander geschliffenen Ränder der Halbkugeln werden vor dem Versuche mit einer Talgkerze bestrichen. Jedenfalls muß man vor dem Versuche zeigen, daß sie in mit Luft gefülltem Zustande leicht auseinander gehen. E. Schulze (1885) empfiehlt die Kraft des Zusammenhanges durch einen Hebel mit Laufgewicht nachzuweisen, der in einem geeigneten Stative befestigt und am einen Ende durch einen untergelegten Kloß gehindert wird, beim Abreißen einen zu großen Ausschlag zu erhalten.

Fig. 2635.

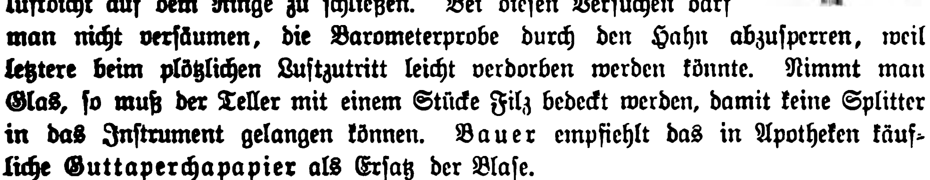


Hering verwendet statt der Halbkugeln Hohlscheiben von 30 cm Durchmesser, bei welchen schon Ansaugen mit dem Munde genügt, um einen Überdruck zu erzeugen, den die Kräfte zweier Männer nicht zu überwinden vermögen. Man kann damit auch die große Kraft zeigen, mit welcher sie beim Hineinblasen auseinander gepreßt werden [2]).

Auch der Rezipient sitzt durch den Druck der Luft fest auf dem Teller, doch empfiehlt es sich nicht, dieses durch jedermann selbst versuchen zu lassen.

2) Das Blasensprengen. Soll dieser Versuch sicher gelingen, so muß eine frische, eben erst stark aufgeblasene Schweinsblase recht straff über einen 6 bis 10 cm weiten Ring von Glas oder Metall gespannt und darauf getrocknet werden. Der Ring selbst muß hierfür einen verdickten oder, wenn er von Glas ist, einen umgelegten Rand haben und auf der anderen Seite gut eben geschliffen sein. Diese Seite wird, mit Fett bestrichen, auf den Teller der Luftpumpe gesetzt, Fig. 2636. Unmittelbar vor dem Versuche wird die Blase über Feuer — im Winter auf dem Ofen — scharf getrocknet; ohne letztere Vorsicht wird der Versuch leicht mißglücken. Auch eine dünne Glasplatte kann auf demselben Ringe gesprengt werden, wenn sie eben genug ist, um mit Fett luftdicht auf dem Ringe zu schließen. Bei diesen Versuchen darf man nicht versäumen, die Barometerprobe durch den Hahn abzusperren, weil letztere beim plötzlichen Luftzutritt leicht verdorben werden könnte. Nimmt man Glas, so muß der Teller mit einem Stücke Filz bedeckt werden, damit keine Splitter in das Instrument gelangen können. Bauer empfiehlt das in Apotheken käufliche Guttaperchapapier als Ersatz der Blase.

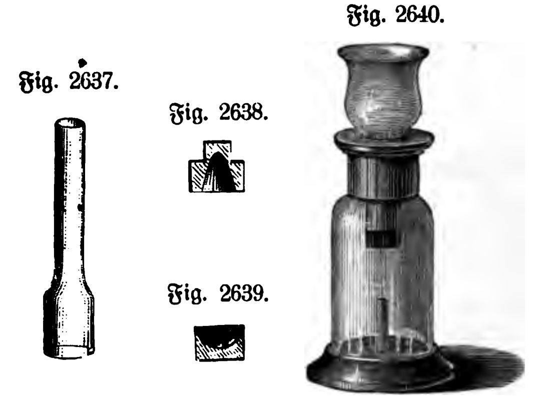
Fig. 2636.



3) Das alte Experiment von Guericke, eine mit Hahn versehene Hohlkugel zu evakuieren, nach Schließen des Hahnes von der Pumpe abzuschrauben und nun unter Wasser zu öffnen, zeigt ebenfalls deutlich die Wirkung des Luftdrucks.

[1]) Ist beispielsweise der innere Durchmesser = 0,085 m, so beträgt der Druck: $\pi . 4{,}25^2 . 1{,}033$ = 60 Kilogramm = 60 . 981 000 = 58 860 000 Dynen. — [2]) Zu beziehen von der Lehrmittelfabrik von Carl Hering in Auerbach i. V., Königreich Sachsen, für 15 Mk.

4) Einen Apparat für den Quecksilberregen kann man sehr einfach aus einem Lampenkamin, Fig. 2637, herstellen, dessen erweiterte Seite eben geschliffen wird. In die andere Seite wird ein abgedrehtes Stück Nußbaumholz, wie Fig. 2638 im Durchschnitte zeigt, eingekittet; ein anderes zu einem Napfe ausgedrehtes Stück, wie Fig. 2639, wird in den erweiterten unteren Teil auf den Teller gestellt, um das Quecksilber aufzufangen, damit nicht etwa ein Tröpfchen davon in die Luftpumpe gelangen und den Schluß der Hähne verderben könne. (Lb, 15, Fig. 2640.)


Fig. 2637. Fig. 2638. Fig. 2639. Fig. 2640.

Erkmann (1885) empfiehlt ein weithalsiges Stöpselgefäß, dessen Stöpsel aus einem konischen Glasgefäße gebildet wird. In dieses wird eine konische Holzscheibe so eingekittet, daß darüber genügend Raum zum Aufbringen des Quecksilbers bleibt. Unter der Holzscheibe ist in dem Gefäße eine schief aufsteigende Bohrung angebracht, welche die Kommunikation mit dem äußeren Gefäße und somit auch mit der Luftpumpe herstellt und durch welche nach dem Versuche das angesammelte Quecksilber ausgegossen werden kann. Hierdurch wird mit größerer Sicherheit bewirkt, daß kein Quecksilbertropfen in die Luftpumpe gelangen kann. Manche Mechaniker konstruieren den Quecksilberregen doppelt, so daß man nach dem Versuche nur nötig hat, das Gefäß umzukehren, um den Versuch sofort wieder anstellen zu können. (Lb, 8.)

Klimpert (1890) ersetzt das Quecksilber durch Schweineschmalz. Statt Holz dient ein Sieb mit 3 mm weiten Poren auf hohem Cylinder.

253. **Gassäcke und Glockengasometer.** Wie schon oben S. 916 erwähnt, kann die Luftpumpe auch dazu dienen, Gase umzufüllen. Zur Ansammlung und Aufbewahrung kleinerer Gasmengen sind am bequemsten Kautschuksäcke mit Hahn, wie sie zur Herstellung von Kalklicht vielfach benutzt werden (Fig. 2641 Lb, 98)[1]. Wenn möglich, wird man aber immer einen Glockengasometer vorziehen, da man bei Kautschuksäcken nie sicher ist, ob sie genügend dicht sind.



Fig. 2641.

Auch eine Schweins- oder Ochsenblase mit Hahn dient zuweilen zur Aufbewahrung von Gasen. Für genaue Versuche werden Gaspipetten gebraucht, bestehend aus beiderseits mit Hahn versehenen weiten Glasröhren. Man füllt dieselben mit Wasser oder Hg und läßt dasselbe ausströmen, während statt dessen Gas eindringt. Meßröhren zum Auffangen von Gasen über der pneumatischen Wanne finden mannigfaltige Anwendung. (Vgl. auch S. 567 u. ff.)

[1]) Man kann solche auch beziehen von Ed. Liesegang in Düsseldorf, Kavalleriestraße 6 und 13, zum Preise von 45 bis 120 Mk.

254. Aspiratoren. Andrews (1853) empfiehlt einen Aspirator, bestehend aus einem Glockengasometer, dessen Glocke durch ein Uhrwerk gleichmäßig gehoben wird. Durch denselben wird Luft unter ganz konstanter Druckdifferenz eingesaugt. Gewöhnlich benutzt man indes ein Blechgefäß wie Fig. 2642 (K, 14), welches mit Wasser gefüllt wird und beim Ausfluß des Wassers durch den unteren Hahn durch den oberen Luft einsaugt. Vollkommener ist die Kombination von zwei miteinander durch eine Röhre verbundenen flaschenähnlichen Gefäßen (Fig. 2643, W, 28 bis 32), von welchen das eine mit Wasser gefüllt ist, so daß, wenn dasselbe über das andere gestellt wird, das Wasser in dieses herunterfließt und in das obere Gefäß Luft durch eine Ansatzröhre eingesaugt wird, während die aus dem unteren Gefäße ausgetriebene Luft durch eine gleichliegende Ansatzröhre entweicht. Ist alles Wasser ausgeflossen, so vertauscht man die beiden Gefäße. Indem hierbei jeweils das

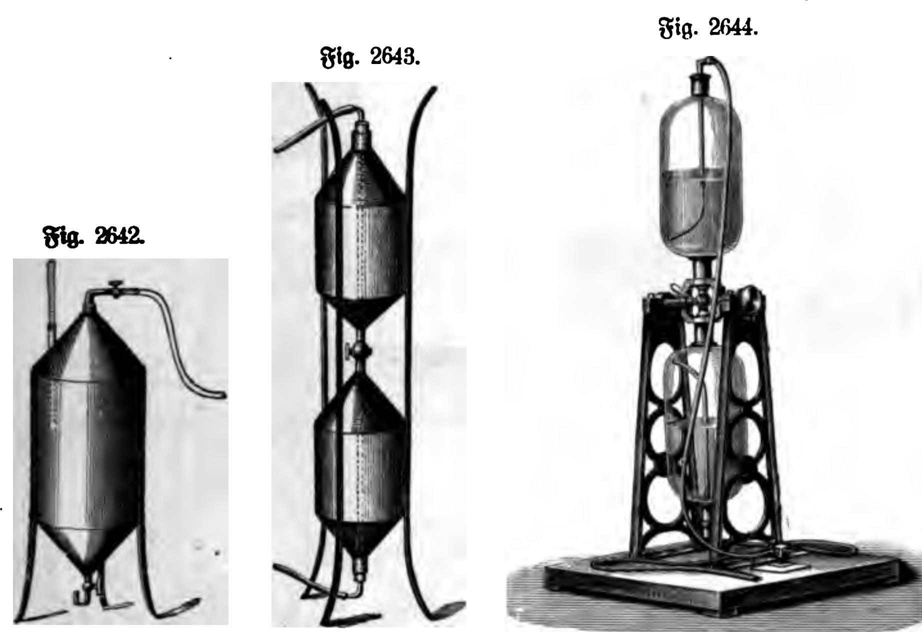


Fig. 2642. Fig. 2643. Fig. 2644.

Saugrohr mit ein und derselben Rohrleitung verbunden wird, entsteht in dieser ein bis auf die kurzen Unterbrechungen beim Umstellen der Gefäße andauernder Luftstrom.

Eine recht praktische Form ist die in Fig. 2644 (E, 110) dargestellte. Auf zwei gußeisernen bronzierten Pfeilern ruht in Lagern eine stählerne Welle, an welcher in entgegengesetzter Richtung zwei cylindrische Glasgefäße mit bekanntem Wasserinhalt befestigt sind, die vermittelst eines Hahns, der zur Regulierung des Abflusses dient, miteinander kommunizieren. Am vorderen Ende der Welle bzw. am oberen Teile des vorderen Pfeilers ist eine einfache federnde Vorrichtung angebracht, die eine senkrechte befestigte Stellung der Glasgefäße gestattet. Jeder Glascylinder trägt in seiner Messingfassung eine aufschraubbare Verschlußplatte, die einerseits mit einer bis fast auf den Boden des Gefäßes reichenden, gebogenen Glasröhre, anderseits mit einem rechtwinklig gebogenen Schlauchstück versehen ist, an welchem die beiden Schläuche befestigt werden, die mit dem auf dem Grundbrett befindlichen Hahn in Verbindung stehen. Dieser den Gefäßen (A) und (B) ent-

sprechend bezeichnete Hahn ist derartig durchbohrt, daß derselbe in derjenigen Stellung, wie die Figur es zeigt, die Verbindung des oberen Gefäßes *A* mit dem betreffenden Apparat, durch welchen Gas gesaugt werden soll, die Verbindung des

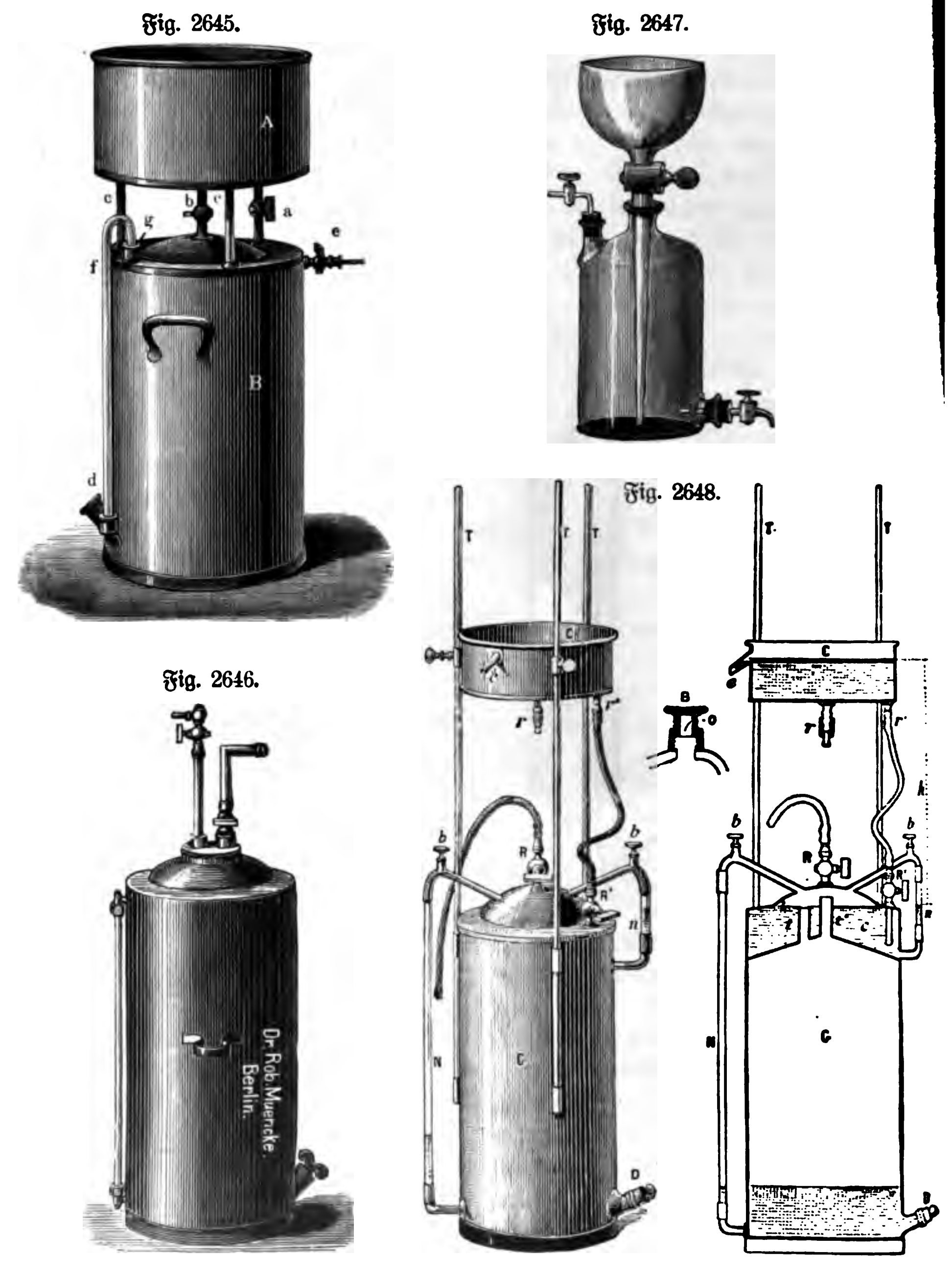


Fig. 2645.

Fig. 2647.

Fig. 2648.

Fig. 2646.

unteren Gefäßes *B* aber mit der Atmosphäre vermittelt. Ist das obere Gefäß abgelaufen, so drückt man auf den Knopf der federnden Vorrichtung, schwenkt die Cylinder um die gemeinschaftliche Achse und dreht den unteren Hahn um 180°. In dieser Stellung ist jetzt das Gefäß *B* in Verbindung mit dem Apparat und Gefäß

A mit der Atmosphäre. Ohne die Schläuche zu wechseln, gestattet daher dieser Doppelaspirator eine fast ununterbrochene Tätigkeit[1]). (M, 110).

Als große Aspiratoren können die in den Fig. 2645 (Lb, 33 bis 66); 2646 (M, 42 bis 62) und 2647 (Lb, 20 bis 35) dargestellten Gasometer[2]) betrachtet werden. Der Druck, unter welchem das Gas in denselben ist, ist größer als der Luftdruck um den Druck der darauf lastenden Wassersäule, ändert sich also mit der Höhe derselben, was in manchen Fällen unbequem ist.

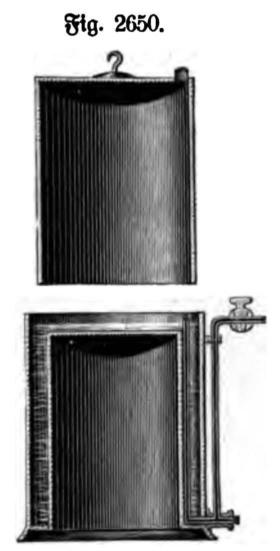
Riban (Z. 14, 227, 1901) hat deshalb die Konstruktion nach Fig. 2648 abgeändert. Das obere Wassergefäß *C* ist verstellbar und hat ein Überfließrohr *c*, welches die Höhe des Wasserstandes bei dauerndem Zufluß unverändert erhält.

Das Wasser fließt aus *C* zunächst in *c* und von hier durch das Überfließrohr *t* in den Gasbehälter *G*. Das Gas entweicht durch *t'* und *R*. Der Wasserstandsanzeiger *N* läßt erkennen, wieviel Gas noch vorhanden ist, *n* ermöglicht die Messung der Druckhöhe *h*. Die Ventile *bb* dienen dazu, beim Füllen des Gasometers die Luft herauszulassen.

Fig. 2649.



Fig. 2650.



255. Glockengasometer. Ein kleines Gasometer der Art, ähnlich wie die Gasometer in den Gasbeleuchtungsanstalten sind, zeigt Fig. 2649. Es besteht aus Zinkblech[3]) und ist mit einer Zuleitungsröhre versehen, welche zugleich zum Abführen der Gase dient. Letztere besteht aus Bleirohr von 6 bis 9 mm Durchmesser. Wollte man dem Apparat größere Dimensionen geben und das innere Gefäß mehr als 15 bis 20 cm weit machen, so würde er im gefüllten Zustande schon schwer zu transportieren sein. Für diesen Fall müßte auf den Boden des äußeren Cylinders ein hohler cylindrischer Körper aufgelötet werden, so daß für das Wasser nur der Zwischenraum zwischen diesen beiden Gefäßen übrig bleibt, und in diesen Zwischenraum

[1]) Über eine besondere Form des Aspirators siehe O. Lehmann, Molekularphysik II, S. 87, 1889. — [2]) Der Gasometer von Muencke bietet den Vorteil, daß man mit großem Drucke arbeiten kann. Gasometer aus Glas ohne Aufsatzreservoir zur direkten Verbindung mit der Wasserleitung liefert Muencke in Berlin zu 41 bis 62 Mk. — [3]) Kreußler (1884) macht darauf aufmerksam, daß Zinkblechgasometer durch kalkhaltiges Wasser angegriffen werden.

würde das bewegliche Gefäß tauchen. Fig. 2650 zeigt einen solchen Apparat mit dem beweglichen Gefäße im Durchschnitt, wobei die Zuleitungsröhre an der Wand des inneren leeren Gefäßes heraufgeführt ist. (M, 50 bis 125, 25 bis 100 Liter.)

Will man überhaupt nur eine Vorrichtung, um die Einrichtung eines solchen Gasometers zu zeigen, so braucht man nur die Bleiröhren mit den Hähnen in ein Zuckerglas zu biegen und eine passende Luftpumpenglocke darüber zu hängen, wo dann die Rollen an Haken in der Decke aufgehängt werden können, die man ja doch zu mancherlei anderen Versuchen daselbst hat.

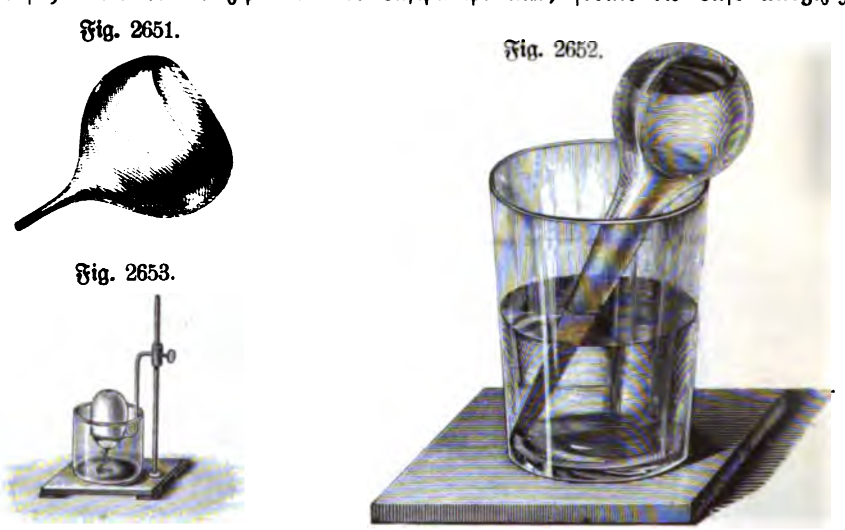
Soll ein solches Gasometer gefüllt werden, so öffnet man die Hähne, nimmt Gewichte ab und läßt die Glocke einsinken; sodann verbindet man den einen Hahn mit dem Gasentwickelungsapparat und gibt der Wagschale so viel Übergewicht, daß sie gerade noch die Reibung zu überwinden vermag. Zum Fortleiten der Gase legt man auf die Glocke Scheiben aus Blei[1]). (Vgl. auch S. 132.)

256. Expansivkraft. 1) Eine fest zugebundene, mit Luft schwach gefüllte Blase dehnt sich unter dem Rezipienten der Luftpumpe aus, sobald die Luft ausgezogen

Fig. 2651.

Fig. 2652.

Fig. 2653.



wird; man kann es dahin bringen, daß die Blase platzt, wenn man zu viel Luft darin gelassen hat. Eine solche Blase bewahrt man am besten unter einer Luftpumpenglocke selbst auf, da sie sonst von einem Jahr zum anderen leicht von Insekten, meist an versteckten Stellen, durchlöchert wird. Vor dem Gebrauche wird sie zweckmäßig in Wasser aufgeweicht. Anstatt einer Schweinsblase kann man auch mit Luft gefüllte Blasen aus vulkanisiertem Kautschuk verwenden.

2) Dünn aufgeblasene Glaskugeln von etwa 3 cm Durchmesser, die man durch Anwärmen auf einer Seite platt werden läßt und nach dem Erkalten an der feinen Spitze zuschmilzt, Fig. 2651, werden beim Evakuieren durch den inneren Druck gesprengt.

3) Man stellt, wie in Fig. 2652, einen mit Wasser bis auf einen kleinen Rest gefüllten Glaskolben in einem weiteren mit Wasser zum Teil gefüllten Cylinder umgekehrt hinein und bringt ihn so unter den Rezipienten. Ein Ei mit Öffnung unten (Fig. 2653, E, 5) läuft aus.

[1]) Glockengasometer sind zu beziehen von Muencke in Berlin zu 60 bis 150 Mk.

4) Holz ist spezifisch schwerer als Wasser. Will man dieses durch die Luftpumpe zeigen, so muß man das dazu bestimmte Stückchen Holz in einem Standcylinder oder Trinkglase durch ein Gewicht unter Wasser halten, dann, wenn es nicht sehr porös ist, ziemlich anhaltend auspumpen und nach dem Luftzulassen noch einige Zeit warten, bis wirklich der atmosphärische Druck das Wasser in die Poren des Holzes gepreßt hat. Je öfter ein Stückchen Holz zu diesem Versuche gedient hat, desto leichter gelingt derselbe damit.

5) Nach gleichem Prinzip können die Luftblasen aus porösen Körpern bei Bestimmung des spezifischen Gewichts, z. B. mittels des Pyknometers nach E. Wiedemann Fig. 2654 (K, 11), entfernt werden.

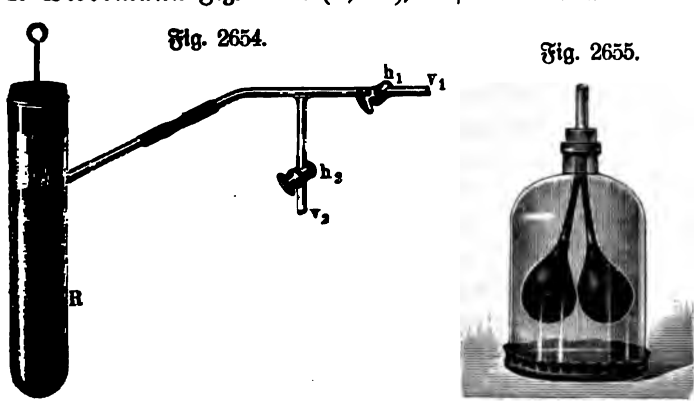


Fig. 2654.


Fig. 2655.

Fig. 2657.

6) Die Funktion der Lungen kann mittels des Apparates Fig. 2655 (L, 9,50) erläutert werden, bei welchem die Membran, mit welcher die Glasglocke unten überbunden ist, die Stelle des Pumpenkolbens vertritt [1]).


Fig. 2656.

257. Die Kartesianischen Taucher. Eine hohle Glaskugel von etwa 1 bis 3 cm Durchmesser, die einerseits noch ein Röhrchen mit einer etwa $^1/_2$ mm weiten Öffnung hat, ist viel zweckmäßiger als die gewöhnlichen, aus undurchsichtigem gefärbtem Glase angefertigten Figuren. Das Füllen der Kugel, wie der Figuren, geschieht durch gelinde Erwärmung über der Weingeistlampe und nachheriges Untertauchen der Öffnung; man bringt so mehr als das erforderliche Wasser hinein und entfernt durch Saugen wieder nach und nach so viel davon, bis die Kugel im Wasser wieder schwimmt und, wenn man zur Probe mit der Hand eine Blase über das Gefäß spannt, wie in Fig. 2656, durch einen mäßigen Fingerdruck auf die Blase zum Sinken gebracht wird. Erst dann bindet man die Blase fest über das Gefäß. Um den Apparat nicht jedesmal erst richten zu müssen, wenn man ihn brauchen will, versetzt man das Wasser zur Verhinderung der Bildung von Organismen mit etwas Salicylsäure und bindet das Glas mit einer Kautschukplatte zu. (Man weise auch auf die Schwimmblase der Fische hin.)

[1]) Einen Apparat zur Demonstration der allseitig gleichmäßigen Druckfortpflanzung unter Verwendung kleiner geschlossener Manometer nach Fig. 2657 liefern Meiser u. Mertig in Dresden N., Kurfürstenstr. 27, zu 4,5 Mk.

Nimmt man ein etwas größeres Gefäß, etwa ein Medizingläschen, als Schwimmer und gibt ihm durch um den Hals gelegtes Blei das erforderliche Gewicht, um es so weit eintauchen zu machen, daß noch ein Teil desselben über das Wasser hervorragt, und bringt dann durch hineingebrachtes Wasser das Gläschen dahin, daß es gerade im Wasser vollständig eintaucht, so sinkt dasselbe zu Boden, wenn man ihm einen auch nur leichten Stoß gibt, weil der mit der Tiefe zunehmende Wasserdruck die Luft im Glase zusammendrückt und dadurch zuviel Wasser in das Glas kommt. Die eigentlichen Taucher müssen darum leicht sein, so daß nur noch wenig Luft darin bleibt.

Auch bei einem solchen Taucher kann man die Wirkung des Wasserdruckes erkennen, wenn man statt des niedrigen Gefäßes eine etwa 1 bis 2 m lange, unten geschlossene Glasröhre nimmt. Man kann den Taucher so justieren, daß er bei Senkung bis zur Mitte der Röhre beim Nachlassen des Druckes wieder aufsteigt, bei tieferer Senkung aber auch ohne Druck immer tiefer bis zum Boden sinkt. Versieht man die Glasröhre oben mit einem Schlauch und saugt an diesem, so steigt er wieder in die Höhe.

Emsmann (1885) beanstandet die Füllung des Tauchers durch vorhergehende Erwärmung, da beim Einbringen des erhitzten Tauchers in das kalte Wasser derselbe leicht zerspringt, und bringt das folgende Verfahren in Vorschlag. Man bringt den Taucher in eine fast ganz mit Wasser gefüllte Flasche aus farblosem Glase (Bier- oder Weinflasche), deren Öffnung so groß ist, daß er bequem hindurchgeht, aber doch so klein, daß man sie in den Mund nehmen kann. Saugt man an der Flasche ein wenig, so bringt beim Aufhören etwas Wasser ins Innere des Tauchers und er richtet sich gewöhnlich sofort aus seiner Querlage auf. Ist noch nicht genug Wasser eingedrungen, so wiederholt man die Operation, ist dagegen bereits ein Überschuß vorhanden, so nimmt man den Taucher heraus, saugt wieder einen Teil des Wassers heraus und beginnt die Füllung von neuem.

Stolzenburg (1885) hält die angegebene Form für unzweckmäßig, da man bei derselben infolge des großen Querschnittes das Steigen und Sinken des Wassers im Inneren nicht wahrnehmen kann. Derselbe schlägt vor, eine etwa 3 mm weite, und 60 mm lange, oben geschlossene Glasröhre zu nehmen, welche sich unten zu einer Kugel von etwa 10 mm Durchmesser erweitert, die unten in ein kurzes Röhrchen mit enger Öffnung übergeht. Oben schiebt man über die Röhre eine Korkscheibe von solcher Größe, daß der Apparat im Wasser schwimmt, aber nur sehr wenig aus demselben vorragt, nachdem man zuvor etwas Wasser in das Innere eingebracht hat, welches die Kugel und einen kleinen Teil der Röhre einnimmt.

Schwalbe (1886) nimmt als Tauchkörper ein Stehkölbchen von 50 g Inhalt, schließt dasselbe mit Gummikork, durch dessen Durchbohrung ein gut schließendes Glasrohr mit geringer Weite in das Kölbchen hineinragt. Dasselbe wird bis zu etwa 5 ccm mit Wasser gefüllt, dem etwas gelbes Blutlaugensalz beigemischt ist. Alsdann setzt man es mit dem Korke nach unten in einen Standcylinder von 6 cm Weite, der mit einer äußerst verdünnten Lösung von Eisenchlorid in Wasser gefüllt ist und, wie gewöhnlich, mit einer Blase verschlossen wird. Übt man nun einen Druck auf die Blase aus, so tritt im Kölbchen sofort eine tiefblaue Färbung ein, während gleichzeitig der Taucher sinkt. Umgekehrt sieht man beim Steigen des Tauchers von der Mündung der Röhre schlierenartige blaue Streifen ausgehen. An Stelle der Blase empfiehlt Schwalbe einen durch Kautschukschlauch mit dem Cylinder verbundenen hohlen Gummiball.

Handl (1885) schlägt vor, statt der Membran einen durchbohrten Gummistopfen zu nehmen, durch welchen ein als Kolben wirkender Glasstab eingeschoben werden kann. **Heyden** (1886) ersetzt den Glasstab durch ein langes Trichterrohr, in welches Flüssigkeit bis zu verschiedener Höhe aufgeschichtet, bzw. durch einen Heber wieder entnommen wird. Am einfachsten dürfte es wohl sein, einen Standcylinder mit engem seitlichem Tubulus nahe dem Boden zu wählen und den Tubulus durch einen Kautschukschlauch mit einem Trichter zu verbinden, der sich beliebig heben und senken läßt, dagegen die obere Öffnung des Standcylinders durch einen Stöpsel dauernd zu verschließen. Je nachdem man dann den Trichter hebt oder senkt, wird der Taucher seine Stellung ändern.

Heyden empfiehlt ferner, um den Eintritt des Wassers in den Taucher deutlich zu machen, demselben folgende Form zu geben. Ein Reagenzglas von 18 cm Länge und 2,5 bis 3 cm Weite wird mit durchbohrtem Kork verschlossen, in welchen eine 5 bis 8 mm weite Glasröhre fast bis an den Boden des Reagenzglases eingeschoben wird. An dem nur wenig über den Kork vorragenden Ende wird sie durch eine angekittete durchbohrte Metallkugel beschwert, deren Gewicht so abgeglichen ist, daß der Taucher, in Wasser gestellt, nur ganz wenig vorragt[1]).

Rebenstorff demonstriert auch das Aufsteigen des Tauchers durch die Expansion der Luftblase unter der Luftpumpe. Weitere Versuche siehe Z. 13, 254, 1900.


Fig. 2658.


Fig. 2659.

258. Gebläse und Druckpumpen. Ein Kautschuksack oder Glockengasometer kann auch dazu dienen, eine Gasmenge zu pressen oder aus einem Behälter in einen anderen hinein zu befördern. Fig. 2659 (E, 33) zeigt z. B. ein Modell einer Taucherglocke, welcher durch ein kleines Gummigebläse oder die **Schlauchpumpe von Prytz**[2]) (siehe S. 913) Luft zugeführt wird. Zu erwähnen wären auch **Skaphander** (Taucheranzüge) und **Senkkasten** für Fundamentierungen.

[1]) Einen Taucher, welcher sich beim Eintauchen von selbst richtig füllt, bestehend aus einem mit Blei beschwerten Reagenzgläschen mit einer kleinen seitlichen Öffnung, beschreibt **Rebenstorff**, Z. 13, 249, 1900. Eine Kollektion solcher Tauchcrröhrchen nach Fig. 2658 liefern **Meiser** u. **Mertig**, Dresden N., Kurfürstenstr. 27, zu 7,25 Mk.; ferner **G. Lorenz**, Chemnitz und **A. Eichhorn** in Dresden (Mittelstr.). Der Grad der Luftfüllung beim labilen Gleichgewicht ist durch eine Marke angedeutet. Durch die Art des Einsenkens, sowie durch Überstülpen der langen Röhren, Fig. 2658, kann man die Luftfüllung ändern.

Fig. 2660 (Lb, 650) zeigt einen größeren **Blasebalg** für akustische Zwecke; andere Formen sind bereits auf S. 133 und 134 angegeben. **Druckpumpen**

Fig. 2660.

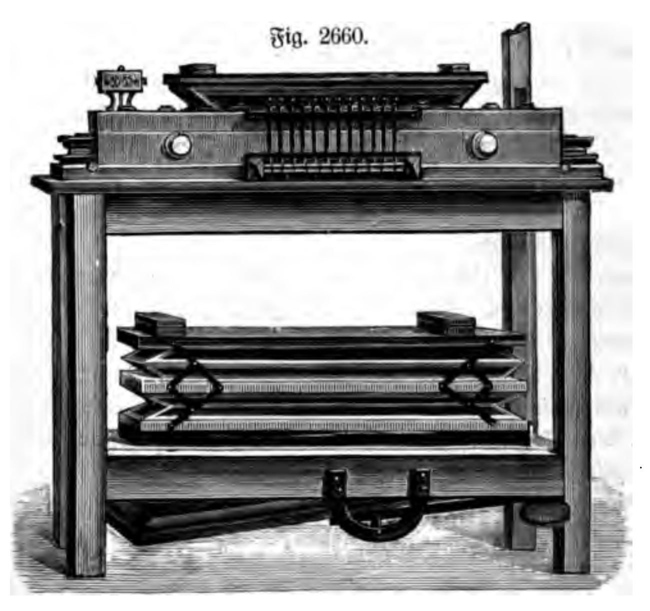


Fig. 2661.



Fig. 2662.



für Gase sind ebenso eingerichtet, wie die für Flüssigkeiten. Beispielsweise zeigt Fig. 2661 eine von Franz Hugershoff, Leipzig, Carolinenstr. 13, zu 185 Mk.

zu beziehende Druckpumpe; Fig. 2662 (E, 145) eine Handkompressionspumpe mit gläsernem Rezipienten (nicht ungefährlich!).

Bezüglich anderer Gebläseformen, insbesondere **Kompressoren**, sei verwiesen auf das bereits S. 129 Gesagte. Als Modell des **Schieber-Kompressors** können die bereits früher behandelten Wassermotormodelle dienen. (S. 805).

Auch ein **Dampfmaschinenmodell**, durch einen Motor getrieben, läßt sich als Gebläse verwenden.

Sogenannte **Vierpressionspumpen** sind überall zu haben und eignen sich, an ein passendes Stativ befestigt, auch für physikalische Zwecke [1]).

Radfahrerpumpen sind ebenfalls für manche Zwecke zu gebrauchen.

Fig. 2663.



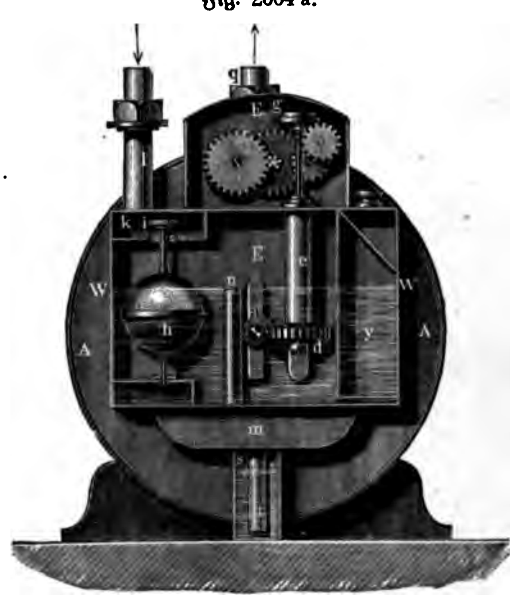
Eine **Pumpe mit oszillierendem Cylinder** nach **Petri** zum genauen Bestimmen des angesaugten Luftquantums mit Zählwerk liefert Dr. H. **Rohrbeck**, Berlin NW., Karlstr. 20a, nach Fig. 2663 zu 125 Mk.

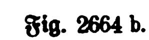
259. Gasuhr. Die Fig. 2664a und b zeigen eine Demonstrationsgasuhr von **Leybolds Nachf.** Köln (Preis 50 Mk.). Die Gebrauchsanweisung lautet: Der obere Teil der Hinterwand *A* (Fig. a) und die Vorderwand des Kastens *E* (Fig. b) sind ganz aus Glas hergestellt, die Klappe über dem Uhrwerk *E* (Fig. b) ist zum Abnehmen eingerichtet. Außerdem wurde an der Vorderwand ein Hahn angebracht zum Ablassen des Wassers und zur Demonstration der Schwimmerwirkung. Alle Schlauchansätze sind ferner so eingerichtet, daß der gewöhnliche Gasschlauch ohne weiteres darüber gesteckt werden kann.

Um den Gasmesser in Gang zu setzen, entfernt man die beiden Schrauben *v* und *u*, setzt unter *u* ein Gefäß und füllt die Gasuhr durch *v* mit Wasser, bis dasselbe bei *u* ausfließt. Sobald das zuviel eingegossene Wasser bei *u* ausgeflossen ist, schließt man *u* und *v*. Das Wasser steht dann bei *W W* so hoch, wie die Öffnung des Röhrchens *n*. Der Schwimmer hat sich gehoben, das Ventil *i* ist offen. Nun

[1]) Sehr auffällig kann die Expansivkraft mit einer Vierpressionspumpe gezeigt werden, wenn man deren Auslaßöffnung durch einen Hahn abschließt. Drückt man den Kolben hinein und läßt ihn wieder los, so schnellt er zurück, wie wenn man eine Feder damit zusammengedrückt hätte. Man kann hier auch erinnern an den ehemaligen Streit, weshalb der Mensch den enormen Druck der Luft aushalten könne, der darin seine Lösung fand, daß die innere Luft so stark komprimiert wird, daß sie mit derselben Kraft nach außen drückt.

Fig. 2664 a.




Fig. 2664 b.

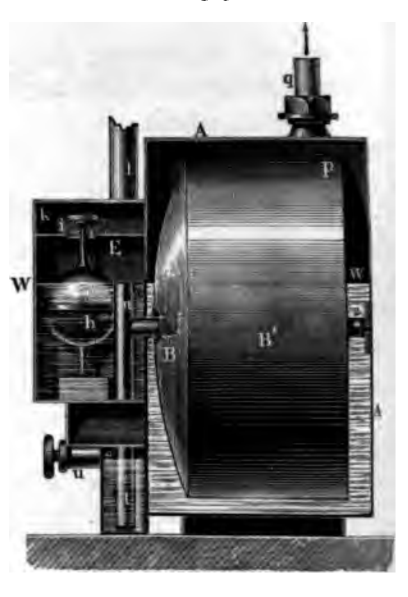


Fig. 2665.



verbindet man l mit der Gasleitung, q mit einem Gasbrenner und öffnet den Hahn der Gasleitung. Das Gas strömt in die Ventilkammer k und durch die Ventilöffnung in die Kammer E. Von hier aus findet es keinen anderen Ausweg als durch die Röhre n (Fig. a und b) und das Knierohr und durch die vorderen Seitenspalten der Trommel, soweit diese aus dem Wasser liegen, hinein und aus den entgegengesetzt liegenden hinteren Seitenspalten wieder aus der Trommel heraus und in den zwischen der Trommel und dem Gehäuse AA befindlichen Zwischenraum (Fig. a), von wo aus es endlich durch das Ausflußrohr q (Fig. a und b) zu den Brennern gelangt. Beim Durchfließen der Trommelkammern übt das Gas auf die schrägen Flächen der Kammern einen Druck aus und bringt dadurch die Trommel in Umdrehung. Diese Rotation der Trommel kann deutlich gesehen werden. Die Rotation der Achse a und des Zahnrades d ist eine zu langsame, um weithin sichtbar zu sein. (Will man eine raschere Rotation erzielen, so braucht man nur die Versuche mit Preßluft anstatt mit Leuchtgas zu wiederholen.) Dagegen ist die Drehung der Trommel g deutlich erkennbar und kann darauf die verbrauchte Gasmenge abgelesen werden.

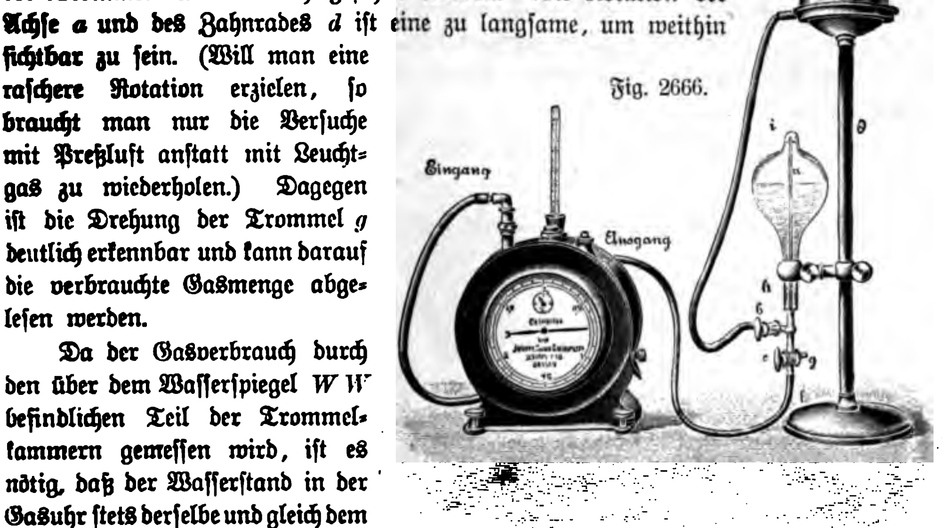


Fig. 2666.

Da der Gasverbrauch durch den über dem Wasserspiegel WW befindlichen Teil der Trommelkammern gemessen wird, ist es nötig, daß der Wasserstand in der Gasuhr stets derselbe und gleich dem der Skala der Uhr zugrundeliegenden sei. Ist dies nicht der Fall, so zeigt die Gasuhr eine entweder für den Lieferanten oder für den Konsumenten ungünstige Gasmenge an. Daher muß eine Gasuhr den richtigen Wasserstand selbst kontrollieren. Um die hierzu getroffene Einrichtung zu demonstrieren, gießt man durch v noch mehr Wasser ein; dadurch steigt das Wasserniveau und wird schließlich die Röhre t und n ganz ausfüllen, so daß dem Gase der Zugang zu dem Knierohr und der Trommel abgeschnitten ist: der an q angeschlossene Gasbrenner erlischt, die Uhr liefert kein Gas, bis durch Öffnen der Mündung u das überflüssige Wasser abgelassen und der Normalwasserstand WW erreicht ist. Ist anderseits der Wasserstand zu niedrig, läßt man also durch Öffnen des unten angebrachten Hahnes Wasser ausfließen, so sinkt mit dem Wasserstande auch der Schwimmer h, und das Ventil i wird geschlossen, es kommt kein Gas in die Uhr und zu den Brennern. Der an q angeschlossene Brenner löscht also aus. (Preis 50 Mk.)[1]

[1]) Eine Experimentiergasuhr nach Clemens Winkler 1892, Fig. 2665 liefert Muencke in Berlin zu 160 bis 275 Mk.; eine Eichvorrichtung für Gasmesser nach Junkers (Fig. 2666) ist zu beziehen von Junkers u. Co., Dessau 3. Gasmesser verschiedener Systeme liefern Junkers u. Co., ferner S. Elster, Berlin NO. 43, J. Pintsch, Berlin O., Andreasstr. 72; trockene Gasmesser (nach dem Prinzip des Blasbalgs), Ließmann u. Ebeling, Königsberg i. Pr. S. a. S. 26, Anmerk. 1.

Zuweilen werden Gasuhren auch als Pumpen gebraucht, welche meßbare Gasmengen fördern, z. B. bei dem Gasolingasapparat Fig. 24, S. 30.

260. Baromanometer. Um den Druck irgend einer abgeschlossenen komprimierten Gasmasse zu bestimmen, kann ein Barometer, insbesondere ein Heberbarometer von genügender Länge gebraucht werden. Verbindet man z. B. den offenen Schenkel mit einem Kautschukbeutel oder Gummigebläse und verstärkt durch Zusammenpressen desselben den Druck der Luft, so erhöht sich entsprechend der Barometerstand, umgekehrt wird er kleiner, wenn man etwa mittels eines Kautschukschlauchs direkt mit dem Munde oder einer kleinen Pumpe Luft aussaugt.

Man erhält durch ein so benutztes Barometer den wahren Druck des Gases. Für die meisten Zwecke ist die Kenntnis desselben indes unnötig, man wünscht vielmehr den künstlich auf das Gas ausgeübten Druck zu kennen, d. h. den Unterschied gegen den Atmosphärendruck, den sogenannten Überdruck. Hierzu dient das offene Manometer.

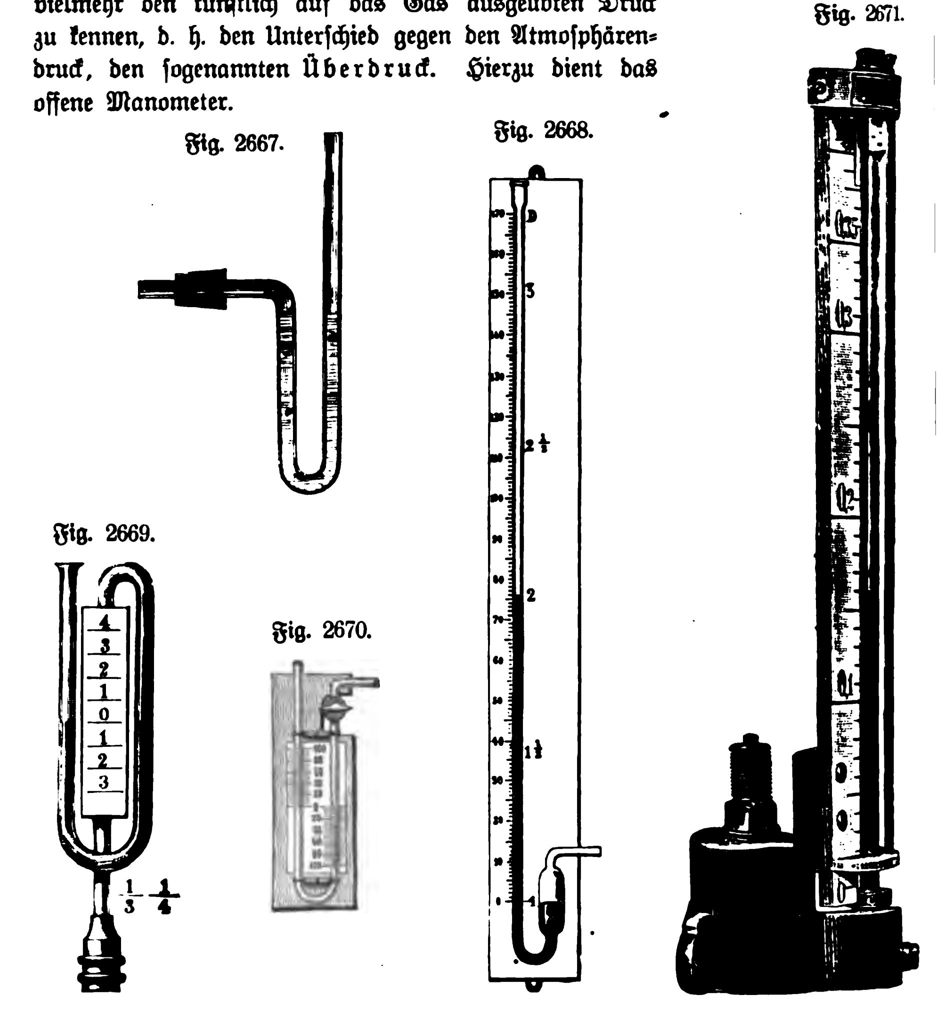


Fig. 2667. Fig. 2668. Fig. 2669. Fig. 2670. Fig. 2671.

261. Das offene Quecksilber- und Wassermanometer. Gefäß- und Hebermanometer sind in den Fig. 2667 und 2668 (K, 40) bzw. Fig. 2669 und 2670 (Lb, 4,50) dargestellt. Beim Wassermanometer dient als Flüssigkeit gewöhnlich Kochenillewasser, das mit etwas Schwefelsäure versetzt ist, oder verdünnte Indigo-

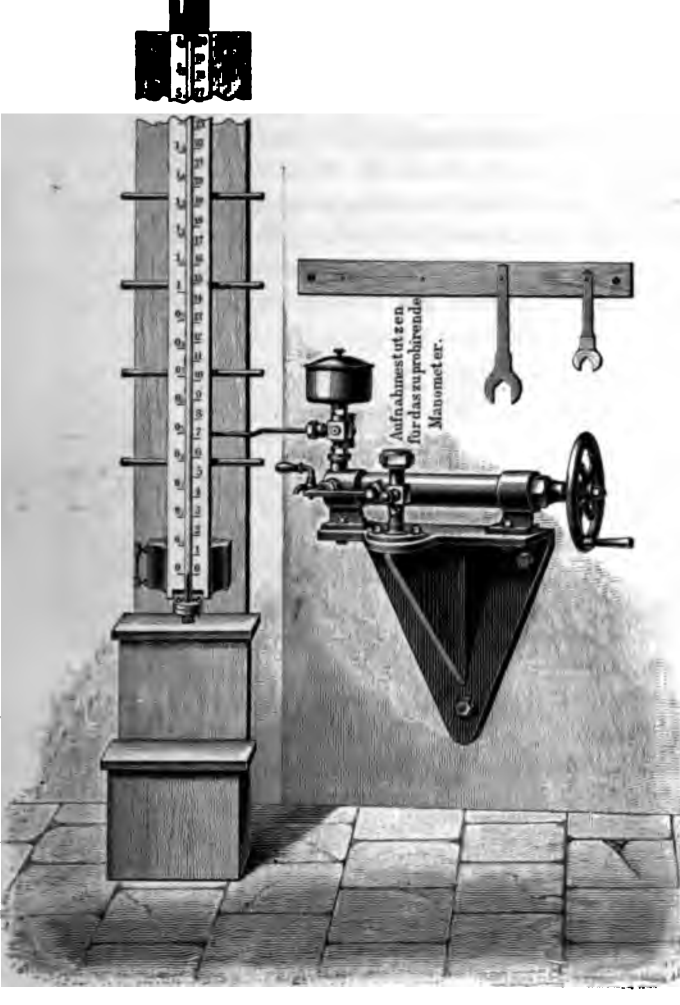


Fig. 2672.

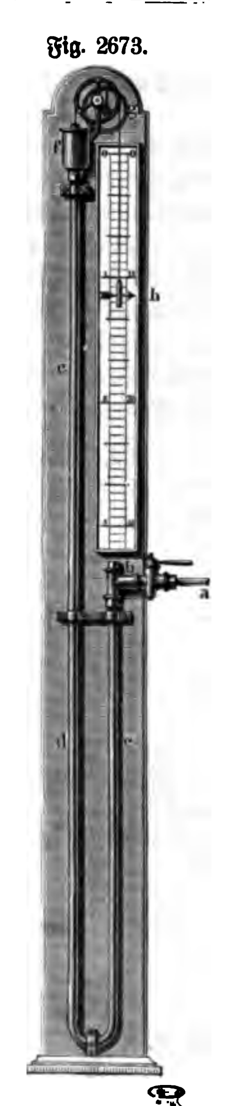


Fig. 2673.

lösung in Schwefelsäure, oder schwefelsaures Kupferoxydammoniak oder Ketonblau (vgl. § 143, S. 814).

Bei engen Röhren ist die Verschiedenheit von **Kapillarelevation** bzw. **Kapillardepression** in beiden Schenkeln störend. Letztere beträgt übrigens bei Quecksilbermanometern von 15 mm weit weniger als 0,1 mm.

Größere Quecksilbermanometer werden aus Eisenrohr hergestellt[1]. Die Ablesung wird mittels eines Schwimmers bewirkt. (**Radmanometer**, Fig. 2673, E, 75).



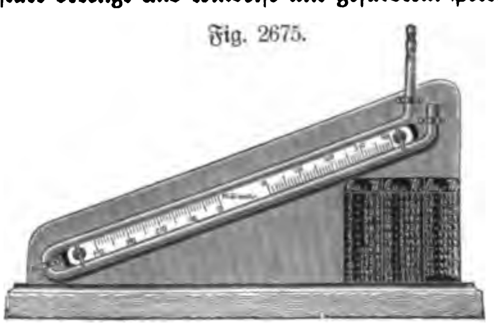
Fig. 2674.

[1]) Fig. 2671 zeigt ein von **Richard Gradenwitz**, Mechan. Werkstatt u. Apparatebauanstalt, Berlin S., zu beziehendes Quecksilbermanometer bis 0,4 kg pro qcm reichend. Preis 20 Mk. Ein hohes **Normalquecksilbermanometer** mit Druckpumpe zur Prüfung von Federmanometern nach Fig. 2672 liefern **Schäffer u. Budenberg** in Magdeburg.

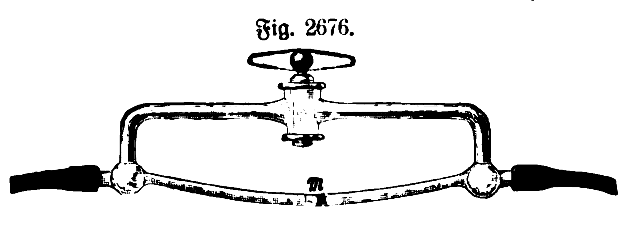
Übrigens lassen sich auch handliche Quecksilbermanometer für höhere Drucke nach dem in § 146, S. 818 besprochenen Prinzip herstellen[1]).

Unter den offenen Manometern muß auch die Weltersche Sicherheitsröhre angeführt werden, Fig. 2674. Sie dient zunächst dazu, um bei Gasentwickelungen die Gefäße vor dem Zerplatzen zu sichern, indem das Gas die Flüssigkeit austreiben kann, welche sich dann im Trichter ansammelt. Aus dem Unterschiede im Stande der Flüssigkeiten kann man aber auch den Druck erkennen, den das Gas auf die Wände des Gefäßes ausübt. Außerdem kann man, wenn die Gasentwickelung, also der Druck nachläßt, durch Nachfüllen von Flüssigkeit, z. B. von Schwefelsäure bei Wasserstoffgasbereitung, den äußeren Druck so sehr verstärken, daß die Säure durch den anderen Schenkel in das Gefäß fließt und dadurch die Gasentwickelung wieder in Gang bringen.

262. Empfindliche Manometer. Ein Quecksilbermanometer kann man empfindlicher machen, indem man den offenen Schenkel über dem Quecksilber stark verengt und teilweise mit gefärbtem Petroleum füllt. (Vgl. Fig. 2555, S. 903.) Einer kleinen Verschiebung des Quecksilberspiegels entspricht dann eine große Änderung im Stande des Petroleums. (Indexmanometer.)


Fig. 2675.

Um mit einem gewöhnlichen Wassermanometer sehr geringe Druckdifferenzen messen zu können, wird das Manometer, statt vertikal, je nach Bedürfnis geneigt aufgestellt. (Schiefe Manometer[2]).


Fig. 2676.

Biegt man die Schenkel eines gewöhnlichen Wassermanometers in ihrer Ebene auseinander, bis sie einen sehr stumpfen Winkel bilden, so entsteht die sogenannte Drucklibelle. Maneuvrier (Z. 9, 244, 1896) konstruiert dieselbe in der in Fig. 2676 dargestellten Form.

Fr. C. G. Müller (Z. 2, 275, 1889) empfiehlt eine Drucklibelle bestehend aus einer 3 bis 4 mm weiten, 600 mm langen, in der Mitte schwach durchgebogenen Glasröhre, welche einen Index aus mit Alkanna rot gefärbtem Äther enthält und auf einem Stativ mit Stellschrauben befestigt ist, um den Index auf 0 bringen zu können. Eine ähnliche Form wurde von M. Töpler angegeben.

Eine modifizierte Form der Drucklibelle ist das Seifenhäutchenmanoskop von Fr. C. G. Müller (Z. 8, 358, 1895) bestehend aus einer in Zehntelkubik-

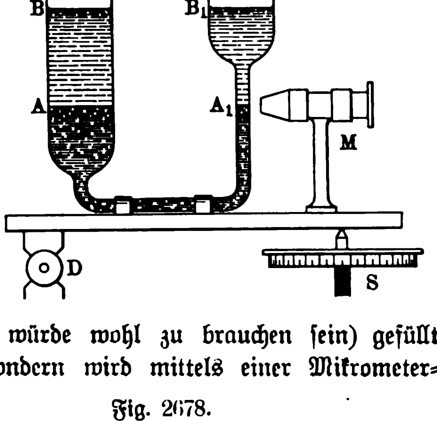
[1]) Solche Wellenrohrmanometer liefert Rich. Gradenwitz, Berlin. Vgl. Thiesen, Zeitschr. f. Instr. 1881, S. 114. — [2]) Ein schräges Manometer nach Fig. 2675 liefern Dreyer, Rosenkranz u. Droop in Hannover zu 25 Mk. Recknagels Differentialmanometer (Wied. Ann. 2, 1877) ist ebenfalls ein schiefes Manometer, dessen einer Schenkel so weit ist, daß sich der Flüssigkeitsstand nicht merklich ändert. Es ist zu beziehen von Dr. Bender u. Dr. Hobein in München.

centimeter geteilten, horizontal aufgestellten Bürette, in welcher sich eine Seifenlamelle befindet. Wird der Luftdruck auf einer Seite vergrößert, so verschiebt sie sich nach der entgegengesetzten Seite und zwar ohne meßbaren Gegendruck. Eine Gleichgewichtsstellung wird deshalb nicht erreicht, man kann nur erkennen, ob eine Druckdifferenz vorhanden ist.

Ist beim schiefen Manometer das spezifische Gewicht der Flüssigkeit $= s$, der Ausschlag $= l$ Centimeter, so ist der Druck $= 2 . s . \sin \alpha . l$ Gramm pro qcm. Statt den Ausschlag abzulesen, kann man ihn auch durch Neigung des Rohres kompensieren. Ist der Abstand der beiden Kuppen $= a$, der Neigungswinkel bei Kompensation $= \varphi$, so ist der gesuchte Druck $= s . a . \sin \varphi$.

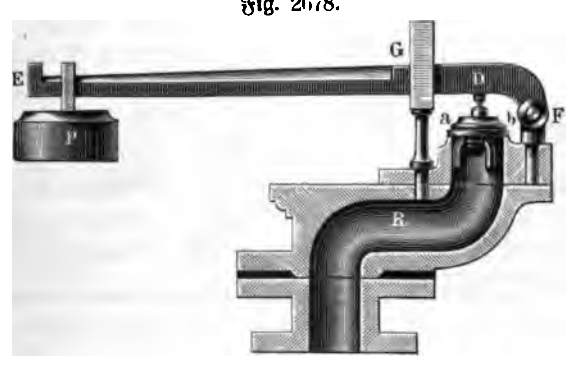
Hierher gehört auch das Differentialmanometer, siehe A. König, Dingl. polyt. Journ. 275, 513, 1890. Die untere Biegung des weiten U-förmigen Manometers ist kapillar verengt und mit einer (als Index dienenden), nur sehr wenig schwereren, nicht mischbaren Flüssigkeit gefüllt. Tritt Niveaudifferenz zwischen den beiden Oberflächen in den weiten Röhren ein, so ist dadurch eine entsprechende, nach dem Querschnittsverhältnis vergrößerte Verschiebung des Index in der (langen) engen Röhre bedingt. Es können auch beide Schenkel mit verschiedenen, nicht mischbaren, aber gleich schweren Flüssigkeiten gefüllt sein, wodurch der Index überflüssig wird[1]).

Fig. 2677.



Das Differentialmanometer von Chattock, Walker und Dixon (Zeitschr. f. Instrumentenkunde 21, 22, 1901), welches zwischen A und B (Fig. 2677) und A_1 und B_1 mit Wasser und zwischen A und A_1 mit Öl von nahe gleichem spezifischem Gewicht (eine Mischung von Öl und Schwefelkohlenstoff mit Alkannin gefärbt, würde wohl zu brauchen sein) gefüllt ist, ist nicht mit einer Skala versehen, sondern wird mittels einer Mikrometerschraube S soweit geneigt, daß der Meniskus bei A auf dem Index M verbleibt.

Fig. 2678.



263. Federmanometer. Die Einrichtung der Wage- und Federmanometer zur Messung von Gasdruck ist dieselbe wie die der hydraulischen Manometer. Als Beispiel eines Wagemanometers kann das Sicherheitsventil (Fig. 2678)

[1]) Zu beziehen von Eugen Albrecht, Universitätsmechaniker, Tübingen, Uhlandstraße 8. Ein Differentialmanometer mit konzentrisch angeordneten Röhren zur Kontrolle der Zug- und Druckverhältnisse bei Feuerungsanlagen liefert Muencke, Berlin, zu 15 Mk.

dienen. Ebenso wie ein offenes Quecksilbermanometer nicht den wahren Druck des Gases angibt, sondern nur den Überdruck über den Atmosphärendruck, so ist dies auch bei den in gewöhnlicher Weise geeichten Federmanometern der Fall [1]).

Zur Messung geringer Drucke benutze ich das Manometer des Aneroidthermoskops von Karsten [2]) (1889). Dasselbe wird durch eine lange Messingkapillare von etwa 1 mm Durchmesser mit dem Gefäß verbunden, in welchem der Druck gemessen

Fig. 2679.



Fig. 2681.

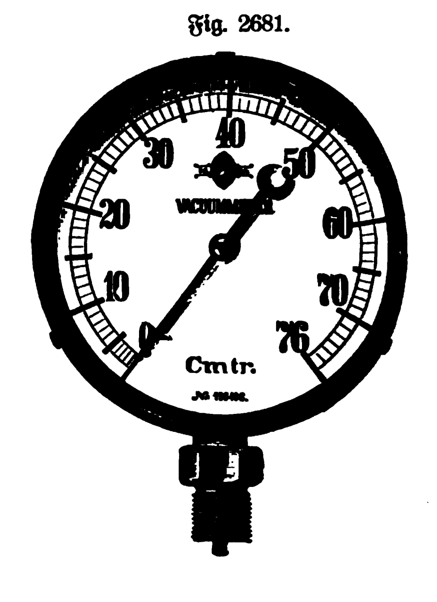
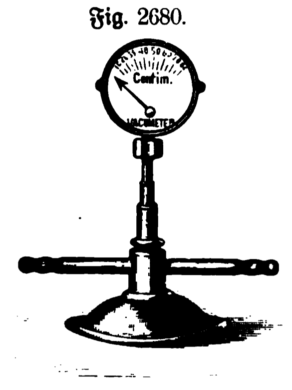


Fig. 2680.



werden soll, z. B. einem Kautschuksack mit aufgelegten Gewichten, in welchen mit einer Druckpumpe Luft eingepumpt wird.

Für sehr geringe Druckdifferenzen dient Altmanns Federmanometer [3]). Ein im Fuße des Instrumentes angebrachter, eigentümlich geformter, aus einer Kombination von dünnem Blech und Gummi bestehender Hohlkörper wird mit dem zu messenden Medium mittels geeigneter Leitung in Verbindung gebracht und erfährt dadurch entweder eine Aufschwellung oder eine Zusammenziehung, je nachdem ein Überdruck oder Minderdruck gegenüber der Atmosphäre vorhanden ist. Die Bewegung des Hohlkörpers ist selbst bei größeren Beanspruchungen sehr unbedeutend und wird mittels großer Übersetzung zwischen einem feinzahnigen Zahnsektor und Getriebe durch einen auf einer Skala spielenden

[1]) Besondere Erwähnung verdient das Vakuummanometer von Schäffer u. Budenberg, Magdeburg, welches sowohl für Drucke über wie unter einer Atmosphäre zu gebrauchen ist. Preis bei 25 bis 470 mm Durchmesser der Skala 22 bis 150 Mk. Verbindet man dasselbe mit einer Handluftpumpe und zieht den Kolben mehr und mehr heraus, so nähert sich der Zeiger einer Grenze, welche etwa dem äußeren Drucke 1 kg pro Quadratcentimeter entspricht. Kleine Manometer bis 3 oder 4 Atm. von 50 mm Durchmesser liefert dieselbe Firma zu 6 Mk. — [2]) Zu beziehen von L. Steger, Kiel, Am Wall, zu 50 Mk. — [3]) Zu beziehen von Ad. Altmann u. Co., Berlin N., Ackerstr. 68.

Zeiger deutlich sichtbar gemacht. Trotz außerordentlicher Empfindlichkeit der Instrumente ist (nach Angabe des Erfinders) die Konstruktion derselben äußerst dauerhaft und durchaus nicht subtil [1]).

Federmanometer zur Messung von Drucken unter 1 Atm. (**Vakuummeter** Fig. 2680 Lb, 18; Fig. 2681 Hu, 10) sind von denselben Firmen zu beziehen, welche andere Manometer liefern [2]).

264. Aneroidbarometer. Bringt man den Manometerring (S. 793, Fig. 2331) unter einen Luftpumpenrezipienten auf Teller, aber so, daß die Ansatzröhre luftdicht durch eine Bohrung des Tellers hindurchgeht, also mit der freien Luft kommuniziert,

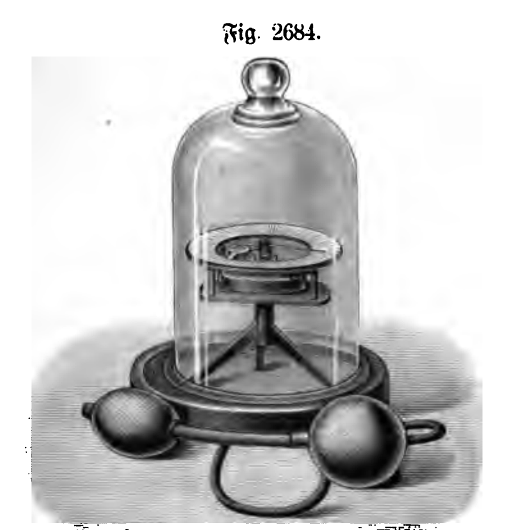
Fig. 2682.



Fig. 2683.



Fig. 2684.



und setzt dann an eine zweite Bohrung des Tellers den zu einem aufgeblähten Kautschuksack führenden Schlauch an und drückt den Kautschuksack, so bewegt sich der Zeiger des Ringes in entgegengesetztem Sinne, als wenn die Luft im Innern verstärkt wird, d. h. die Lücke verengt sich ebenso, wie wenn man den Ring mit einem Cylinder mit Kolben verbindet und den Kolben herauszieht.

Beim Evakuieren ist die Bewegung des Zeigers entgegengesetzt wie bei dem Apparate Fig. 279, S. 210.

Das **Holosterik** von **Vidi** (1847) (Fig. 2682 Lb, 25 bis 35) hat einen dosenförmigen, auf der Fläche geriefelten, luftdicht geschlossenen Körper, das Metallik von **Bourdon** (1854) (Fig. 2683 Lb, 25 bis 35) eine beinahe zum ganzen Kreise gebogene Röhre von elliptischem

[1]) Einen „multiplizierenden Druckmesser" nach **King** für 0 bis 50 mm Wasserdruck zu gebrauchen (Fig. 2679) liefert Fr. **Hugershoff**, Leipzig, zu 88 Mk. Ein sehr empfindliches **Kolbenmanometer** ist das **Sinusmanometer** von J. **Thomson**, Wied. Ann. 6, 451, 1879. — [2]) Eine Vakuummeter-Probierpumpe ist zu beziehen von **Schäffer** u. **Budenberg** in Magdeburg zu 240 Mk.

Querschnitte. Die infolge der Änderung des Luftdrucks eintretenden Veränderungen in der Gestalt des hermetisch geschlossenen Hohlkörpers werden durch Hebelwerke auf den Zeiger übertragen.

Zur Demonstration im Unterricht empfiehlt sich ein Aneroid mit offenem Werk, wie Fig. 2684 zeigt, mit einer Glasglocke bedeckt, so daß man durch Einblasen oder Aussaugen von Luft leicht demonstrieren kann, wie sich der Zeiger bewegt. (L, 28, K, 36 bis 54[1]).

Die Aneroidbarometer müssen sorgfältig mit einem guten Quecksilberbarometer verglichen und ihre Exkursionen danach, wenn nötig, korrigiert werden. Diese Vergleichung muß nötigenfalls unter Beihilfe der Luftpumpe auf der ganzen Skalenlänge, oder doch bis zu einem Barometerstande von 50 cm gemacht werden; denn unter diesem Maße sind die meisten dieser Instrumente unzuverlässig. Die Vergleichung ist auch von Zeit zu Zeit (von Jahr zu Jahr) zu wiederholen, da die meisten derartigen Instrumente sich mit der Zeit ändern; dieses stört übrigens ihren Gebrauch nicht, da die Veränderungen nur langsam eintreten. Sollten die Exkursionen des Zeigers im Vergleiche mit dem Quecksilberbarometer zu groß oder zu klein sein, so läßt sich diesem durch Korrektionsschrauben abhelfen. Empfindlich sind diese Instrumente in hohem Grade und selbst Höhendifferenzen von einigen Metern sind daran abzulesen[2]).

Fig. 2685.

Für Reisen hat man sogar sehr kleine von Taschenuhrform[3]) angefertigt. Als Zimmerbarometer sind namentlich die mit Thermometer kombinierten (Fig. 2685 E, 42) in Gebrauch gekommen.

Als Reisebarometer hat das Aneroidbarometer vor dem Quecksilberbarometer theoretisch den Vorzug, daß es den wahren Luftdruck angibt, während das Quecksilberbarometer denselben nur vergleicht mit dem Quecksilberdruck, also nicht berücksichtigt, daß letzterer nicht konstant ist, sondern je nach der Intensität der Schwerkraft sich von Ort zu Ort ändert. Der österreichische Vizeadmiral von Wüllerstorf-Urbair (1867) hat in der Tat durch Vergleichung der Beobachtungen eines Aneroidbarometers mit denen eines Quecksilberbarometers, welche während der Jahre 1857 und 1858 an Bord der Fregatte „Novara" angestellt worden waren, Werte für die Zunahme der Schwerkraft vom Äquator nach den Polen berechnet, welche mit den auf anderem Wege (aus Pendelbeobachtungen) gewonnenen vortrefflich übereinstimmen.

Selbstregistrierende Instrumente (Barographen) zeigen die Fig. 2686 (K, 30); 2687 (E, 110); 2688 (K, 110).

Die Mängel, welche dem Aneroidbarometer anhaften, sind zum Teil durch den etwas komplizierten Hebelmechanismus bedingt. Es hat deshalb der Mechaniker

[1]) Solche Aneroidbarometer liefert auch Müller-Uri, Braunschweig, zu 36 Mk. — [2]) Bezugsquellen sind: R. Fueß, Werkstätten für wissenschaftliche Instrumente, Steglitz bei Berlin, Düntherstr. 7/8. W. Maeß, Feinmechaniker und Optiker, Dortmund, Westenhellweg 96. W. Niehls, Glasinstrumentenfabrik, Berlin N., Schönhauserallee 168a (Metallbarometer nach Breguet mit Skala für den Unterricht). M. W. Berger, Berlin C. 25, Kaiserstr. 34. Möller u. Sander, Altona a. d. Elbe, Friedenstr. 64. Courvoisier, Spiralfedernfabrik, Chaux-de-Fonds (Schweiz), rue de la Demoiselle. — [3]) Aneroidbarometer in Taschenuhrform für Höhenmessung mit direkter Ablesung von je 1 m Höhe liefert Otto Bohne, Berlin S., Prinzenstr. 90.



Fig. 2686.



Fig. 2687.

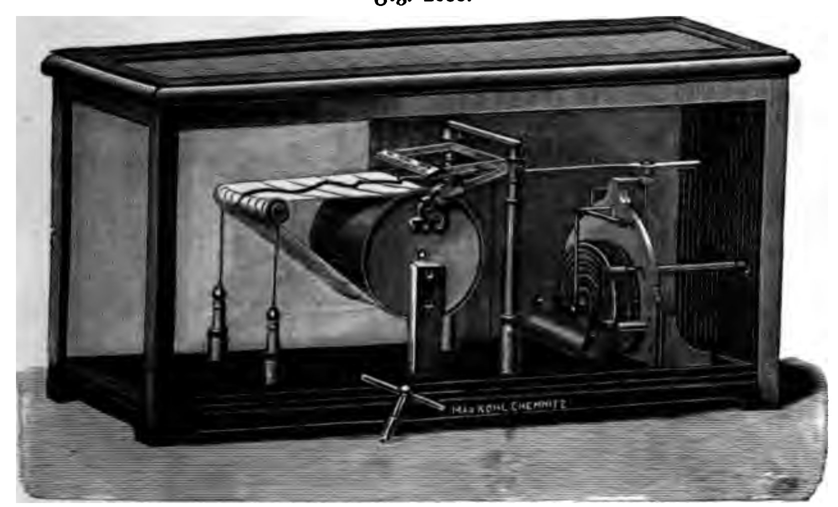


Fig. 2688.

J. Goldschmid in Zürich (später Firma Hottinger) bei seinen Instrumenten (beschrieben 1870) denselben ganz beseitigt und statt dessen eine Mikrometerschraube in Verbindung mit zwei einfachen Hebeln zur Anwendung gebracht[1]). Der Knopf der Mikrometerschraube wird durch den oberen Teil des Gehäuses gebildet. (Fig. 2689 I.b, 100.) In einem seitlichen Schlitz sieht man zwei Indices. Man dreht den oberen Teil des Gehäuses, bis diese Indices koinzidieren, und liest dann die danebenstehende Zahl ab, welche die Hunderte gibt. Die Zehner und Einer gibt dann eine Teilung am oberen Teile des Gehäuses. Durch Vergleich mit einem Quecksilberbarometer muß man, wenn nötig, den Wert dieser Zahlen in Millimeter Quecksilber bestimmen.

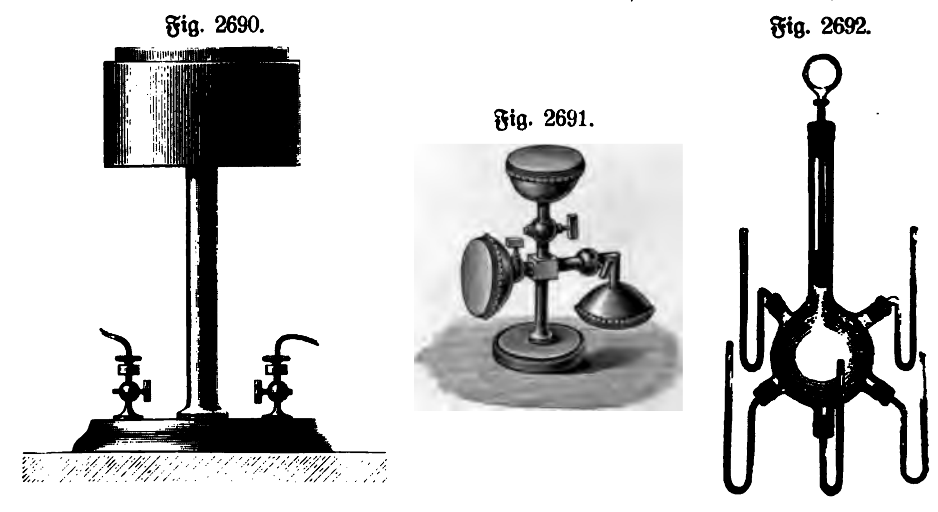


Fig. 2689.

[1]) Die Aneroidbarometer von Goldschmid sind zu beziehen von Th. Usteri-Reinacher (Nachfolger von Hottinger u. Co.) in Zürich, Trittligasse Nr. 34 bis 36. Preis 150 Frank.

Nach Lovering (Dingl. Journ. 122, 315) werden die Kapseln der Aneroidbarometer soweit luftleer gemacht, daß bei Temperaturänderungen die Ausdehnung der darin enthaltenen Luft die Ausdehnung der Kapselwandungen kompensiert. Diese Kompensation ist natürlich nie ganz vollständig und es ist aus diesem Grunde nötig, für jedes Instrument einen Korrektionskoeffizienten für Temperaturänderungen durch direkte Vergleichung mit einem Quecksilberbarometer zu ermitteln. Nach stärkeren Druck- oder Temperaturänderungen gebraucht ein Aneroidbarometer immer längere Zeit, bis es wieder richtige Angaben macht.

265. Gleichförmige Fortpflanzung des Druckes in Gasen. Verbindet man mehrere Manometer durch ein verzweigtes Röhrensystem mit derselben Pumpe, so zeigen alle gleichmäßige Zunahme des Druckes, es ergibt sich somit ganz ebenso wie bei Flüssigkeiten das Gesetz der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes. Zum gleichen Versuche könnte man kleine Glockengasometer benutzen. Wie Fig. 2690


Fig. 2690. Fig. 2691. Fig. 2692.

zeigt, könnte man ein solches Gasometer derart anfertigen, daß dasselbe von der Zuleitungsröhre des Gases getragen wird und durch einen in diese Röhre hineinragenden kantigen Stab eine Führung erhält. Die Zuleitungsröhre verzweigt sich im Fuße zu zwei Hähnchen, von welchen das eine mit einem hohlen Gummiball oder einem kleinen Blasebalg in Verbindung gesetzt wird, um Luft einzublasen, das andere dient dazu, den Apparat mit anderen gleichartigen, eventuell einem solchen von größerem Querschnitt oder einem Manometer zu verbinden. Durch aufgelegte Gewichte kann man den Druck messen.

Um, ohne den Apparat allzu hoch machen zu müssen, erhebliche Drucke anwenden zu können, würde als Flüssigkeit zweckmäßig Quecksilber gewählt werden. Der Apparat müßte aber dann aus Glas oder Eisen bestehen oder gut gefirnißt werden. Um nicht allzu viel Quecksilber zu gebrauchen, müßte das kleine Gasometer wie Fig. 2650 gebaut sein.

Zwei miteinander verbundene gleiche Apparate sind nur bei gleicher Belastung im Gleichgewicht.

Einen einfachen Apparat zur Demonstration des Prinzips, wobei die Manometer ersetzt sind durch Kautschukmembranen, zeigt Fig. 2691 (E, 33); einen

anderen, wobei gewöhnliche offene Flüssigkeitsmanometer angewandt sind [1]), Fig. 2692 (Hu, 4,75).

Sehr deutlich kommt die Gleichmäßigkeit des Druckes zur Anschauung durch die Kugelgestalt von Seifenblasen. Die Herstellung des Seifenwassers wurde bereits oben (S. 845) besprochen.

Zum Aufblasen verwendet man zweckmäßig einen Trichter oder einen abgesprengten weiten Kolbenhals. In letzterem Falle kann man frei in die Röhre hineinblasen, ohne sie an den Mund zu nehmen, und so Blasen bis zu 40 cm Durchmesser herstellen.

Mittels eines empfindlichen Manometers, etwa eines Differentialmanometers, kann man den Druck in einer Seifenblase bestimmen und daraus die Oberflächenspannung berechnen. Die Größe des Drucks ergibt sich nämlich durch folgende Betrachtung. Hat sich durch Aufblasen an der Mündung eines Rohres (Pfeifenkopf, Trichter) eine halbkugelförmige Blase gebildet, so ist die Kraft, mit welcher sie am

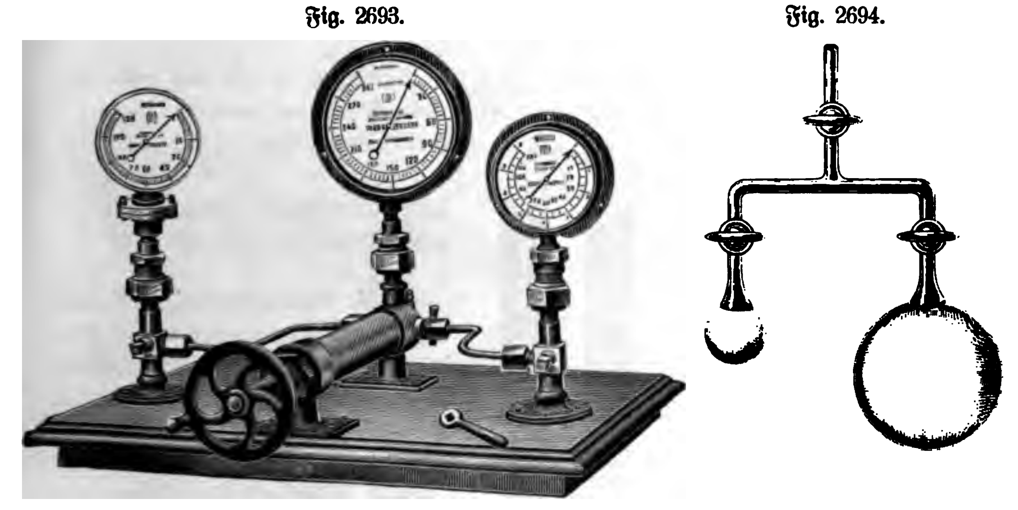


Fig. 2693. Fig. 2694.

Umfang desselben haftet $= 2.2 r\pi . a$, wenn a die Oberflächenspannung in kg pro m bedeutet. Ist nun p der Druck in kg pro qm im Innern der Blase, so ist die Kraft, mit der sie von der Öffnung (Querschnitt $r^2\pi$) fortgetrieben wird $\pi r^2 . p$, also muß sein $4 r\pi a = \pi r^2 . p$ und $p = \frac{4a}{r}$.

Zu gleichem Ergebnis gelangt man durch Betrachtung der Arbeit. Vergrößert sich der Radius um ϱ, so ist die Arbeit $p . 4\pi r^2 \varrho$. Dabei wächst die Oberfläche der Kugel um $4\pi(\varrho + r^2) - 4\pi r^2 = 8\pi\varrho r$. Die Arbeit für Vergrößerung der inneren und äußeren Oberfläche beträgt also $16\pi\varrho r . a$, somit muß sein $p = \frac{4a}{r}$ [2]). Analog ist die Rechnung in Dynen pro qcm.

[1]) Einen Apparat zur Prüfung von Federmanometern nach Fig. 2693 liefern Schäffer u. Budenberg in Magdeburg. — [2]) Nach Dixon (Z. 17, 97, 1904) kann man Quecksilberblasen erhalten, wenn man durch eine gebogene, spitz ausgezogene Glasröhre Luft unter Quecksilber bläst, welches mit einer Schicht Wasser von 1,7 cm Höhe bedeckt ist. Die Blasen haben birnförmige Gestallt und steigen an die Oberfläche des Wassers, wo sie etwa $\frac{1}{2}$ Minute lang sich erhalten. (Die Oberflächenspannung des Quecksilbers ist mehr als 10 mal so groß als die des Seifenwassers.)

Einen Apparat zur Darstellung des labilen Gleichgewichtes zweier kommunizierender Seifenblasen zeigt Fig. 2694. Erzeugt man an der T-förmig verzweigten Röhre Seifenblasen verschiedener Größe, in dem man zuerst den einen, dann den anderen Arm durch Zuklemmen der Schlauchstücke (besser Zudrehen eines Hahnes) verschließt, bringt dann beide in Verbindung, nachdem man das offene Ende der Röhre abgeschlossen hat, so besteht kein Gleichgewicht, da die Wirkung der Oberflächenspannung der kleineren Blase überwiegt und deren Luftinhalt in die größere hinüber drückt.

Kittet man ein Manometer in ein Stück Sandstein und setzt dieses unter Wasser, so steigt das Manometer infolge des Eindringens von Wasser in die Poren beträchtlich.

Von besonderem Interesse ist ferner die Bildung ebener Lamellen und regelmäßiger Schnittwinkel derselben beim Zusammenfließen mehrerer Seifenblasen zu Schäumen [1]).

Ferner gehört hierher die Bestimmung der Kapillarkonstante aus der Höhe von Luftblasen.

Eventuell kann man auch das Aufblasen von Glaskugeln zeigen (bei ungleicher Wandstärke entsteht ein Fläschchen, daher der Ausdruck „fiasco“ machen), sowie die Herstellung großer Hohlkörper aus Glas mittels des Sievertschen Preßluftverfahrens erwähnen (siehe Prometheus **12**, 321, 1901).

Fig. 2695.



Fig. 2696.

266. Das pneumatische Densimeter. Mehrere Manometer, an dieselbe Druckleitung angesetzt, ergeben Niveaudifferenzen, die sich umgekehrt wie die spezifischen Gewichte verhalten. Ein solches „pneumatisches Densimeter“ kann also zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes dienen [2]). (Fig. 2695, 2696 E, 20 [nach Babinet].)

Gleiches gilt, wenn man in zwei oder mehr miteinander verbundenen Röhren, welche in verschiedenen Flüssigkeiten stehen, zugleich einen luftverdünnten Raum erzeugt. Die Flüssigkeiten werden auf den spezifischen Gewichten umgekehrt proportionale Höhen gehoben. Am einfachsten geschieht dies nach Mohr dadurch, daß man, wie Fig. 2697, zwei Glasröhren mittels Kork in einen Kautschukbeutel bindet, den Beutel vorher aus-

[1]) Max Kohl empfiehlt hierzu die von ihm zu beziehende Projektionsküvette. Eine dünne Schicht Seifenwasser bringe man in die Küvette und führe durch Einblasen von Luft aus einer Glasröhre mit dünner Spitze die Bildung von Seifenbläschen herbei. Die äußeren Zellen werden runde Partien aufweisen, während die inneren eine sechseckige Form zeigen. Die Zellen erscheinen in allen Farben des Regenbogens. — [2]) Für Demonstrationen ist es zweckmäßig, die Flüssigkeiten verschieden zu färben. Ölartige Flüssigkeiten färbt man mittels der sogenannten Fettfarben, zu beziehen von E. Merck, chemische Fabrik in Darmstadt.

drückt und es ihm dann überläßt, die Flüssigkeiten aus den untergesetzten Gefäßen anzusaugen.

Handl (1885) gibt der Vorrichtung die in Fig. 2698 dargestellte Form. Das eigentliche Meßrohr *F*, in welchem die zu untersuchende Flüssigkeit aufgesaugt wird, ist in dem Stativ *E* befestigt und steht durch einen engen Kautschukschlauch in Verbindung einerseits mit dem Wassermanometer *B*, getragen von dem Stativ *A*, anderseits mit dem im Fuße des letzteren befestigten Blasebalg *C* (vgl. Michaelis, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1883, S. 268), der vermittelst der Schraube *D* auf- oder zusammengezogen werden kann. An dem Meßrohre befinden sich zwei um 200 mm voneinander entfernte eingeätzte Striche. Man verschiebt das Meßrohr mittels der Mikrometerschraube des Stativs so lange, bis die untere Marke in der Flüssigkeitsoberfläche liegt, reguliert dann mittels des Blasebalgs den Luftdruck derart, daß die Flüssigkeit bis zur oberen Marke aufsteigt, und liest nun den korrespondierenden Stand des Wassers am Manometer ab, wobei, wenn ursprüng-

Fig. 2697.

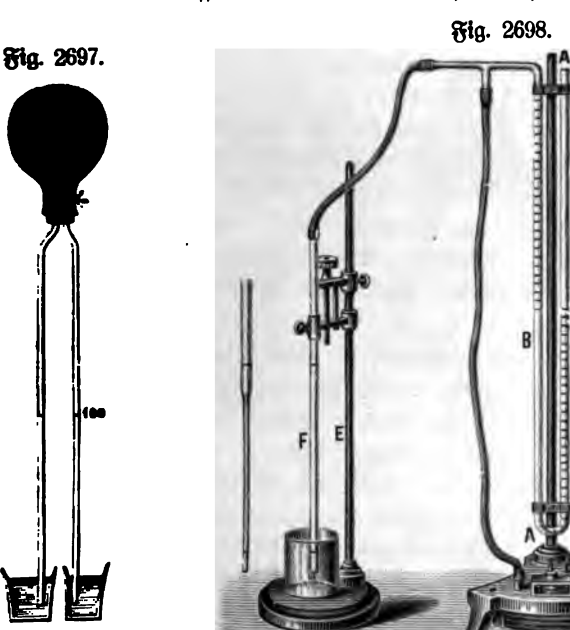


Fig. 2698.


Fig. 2699.

lich das Niveau des Wassers auf 0 stand, was eventuell durch Zutropfen von Wasser korrigiert wird, nur die Erhebung des Wassers im einen Schenkel abzulesen ist, da die Senkung im andern genau ebenso groß ist. Das gesuchte spezifische Gewicht der Flüssigkeit ist dann gleich dem hundertsten Teil dieser Hebung. Da man nun leicht auch noch halbe Millimeter abschätzen kann, so erhält man das spezifische Gewicht auf 0,005 mm genau, was für die meisten technischen Zwecke ausreichend sein dürfte.

Steht nur wenig Flüssigkeit zu Gebote, so ersetzt man das Meßrohr durch ein solches, wie es links neben der Figur abgebildet ist, dessen unterer Teil aus einer engen Kapillarröhre besteht. Man hält mehrere Meßröhren vorrätig, um nacheinander mehrere Bestimmungen ausführen zu können. Das Reinigen und Trocknen

der Röhren ist sehr einfach, und da die Flüssigkeit nicht aus dem Gefäße, in dem sie sich befindet, entfernt zu werden braucht, falls nur dieses Gefäß durchsichtig ist, so geht durch Umfüllen weder Zeit noch Material verloren. Beim Einstellen achtet man auf den Moment, wo die Marke durch die Flüssigkeit, nicht durch die Luft, gesehen mit der Flüssigkeitsoberfläche in gleiche Ebene kommt. (E, 50.)

Ein zur Vergleichung mehrerer Flüssigkeiten geeignetes Instrument zeigt Fig. 2699 (Lb, 5).

267. Wasserstand- und Zugmesser. Fig. 2700 zeigt eine interessante und praktische Anwendung des Prinzips von der gleichförmigen Fortpflanzung des Druckes in Gasen zur Messung eines Wasserstandes oder der Höhe irgend einer anderen Flüssigkeit von einem entfernten Orte aus. Die kleine Glocke wird in die Flüssigkeit versenkt und das mit derselben durch eine biegsame Kupferkapillarröhre in Verbindung stehende Federmanometer an den Beobachtungsort gebracht. Der Druck der Luft in der Glocke entspricht natürlich der darüber stehenden Flüssigkeitssäule[1].

Fig. 2700.



Um den Apparat im Kleinen zu zeigen, kann das Aneroid des Aneroidthermoskops von Karsten (siehe S. 964) verwendet werden.

Einen Zugmesser zur Bestimmung des Luftdruckes in einem Schornstein an einer bis 30 m davon entfernten Stelle liefert Alphons Custodis, Düsseldorf. In einem gußeisernen Gehäuse befindet sich eine bewegliche, an einer Art Zeigerwage hängende Glocke, welche in eine Sperrflüssigkeit eintaucht. Als solche hat sich infolge seiner Unveränderlichkeit gereinigtes Paraffinöl vorzüglich bewährt.

In den Hohlraum der Glocke, durch das Bassin hindurch, in welchem sich die Sperrflüssigkeit befindet, mündet ein Röhrchen, an welchem bereits ein Anschluß für ein weiteres (etwa 3/8 zölliges) Gasrohr vorgesehen ist, dessen Ende nun an jener Stelle eingeführt wird, wo die Zuggeschwindigkeit, z. B. der abziehenden Gase einer Feuerungsanlage, gemessen werden soll.

Fig. 2701.

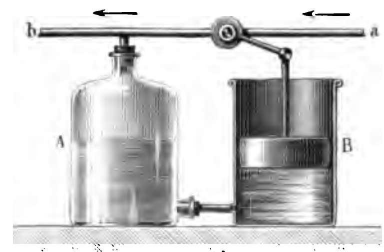


Fig. 2702.



268. Druckregulatoren. Ein sehr einfacher Druckregulator wurde von v. Hauer (1855) konstruiert. Das Prinzip desselben ist in nebenstehender Fig. 2701 dargestellt. Das Gas tritt durch a ein, durch b aus. Wird der Druck im Gefäße A zu groß,

[1]) Der Apparat ist zu beziehen von der Aktiengesellschaft Schäffer und Walcker in Berlin SW., Lindenstr. 18, zum Preise von 40 bis 62 Mk.

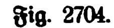


Fig. 2704.



Fig. 2703.

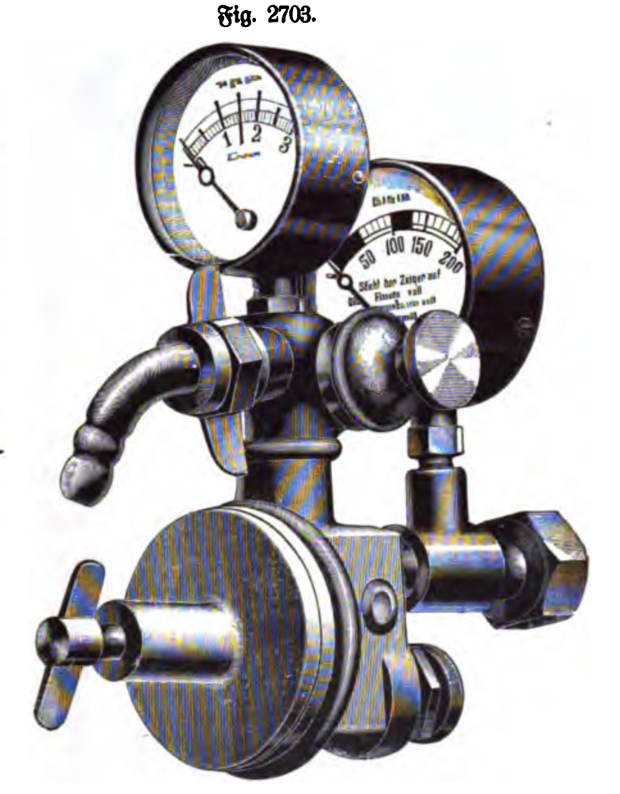
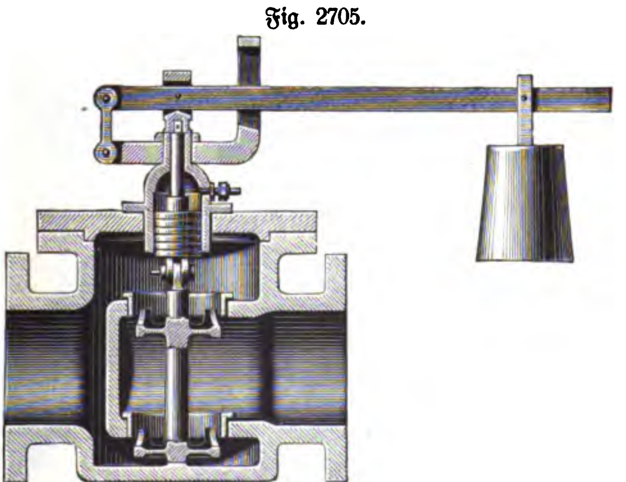


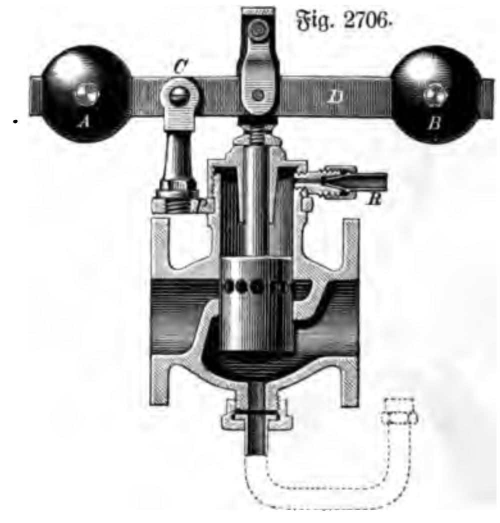
Fig. 2705.



so wird das Wasser zum Teil nach *B* getrieben, hebt den dort befindlichen Schwimmer, der durch Stange mit Gelenk mit der Hahnkurbel verbunden ist, und bewirkt so, daß der Hahn zugedreht wird, bis der Druck wieder der normale ist.

Kundsen (1884) benutzt für bestimmte Zwecke den in Fig. 2702 dargestellten Regulator. Das Gas tritt durch *a* ein, durch *d* aus. Wird der Druck im Gefäße *A*, in welches das Gas durch *cc* Zutritt hat, größer, so steigt die Flüssigkeit im Rohre *B* empor und erschwert den Durchfluß des Gases.

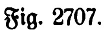
Einen ähnlichen Druckregulator stellte ich mir her mittels eines Gassacks, dessen Belastungsgewicht durch ein Gestänge mit dem Zuflußhahn in Verbindung gebracht wurde, so daß sich dieser beim Aufblähen des Sacks schloß. Es war auf diesem Wege möglich, konstanten Druck von wenigen Centimetern Wasser zu erhalten, während sich in der Zuflußleitung (aus einem Kessel mit komprimiertem Gas) der Druck um 1 bis 2 Atmosphären änderte. Wegen der großen Fläche des Gassacks ist auch bei geringer Druckänderung die Kraft, mit welcher der Hahn gedreht wird, eine bedeutende, so daß dessen Reibung nicht in Betracht kommt.

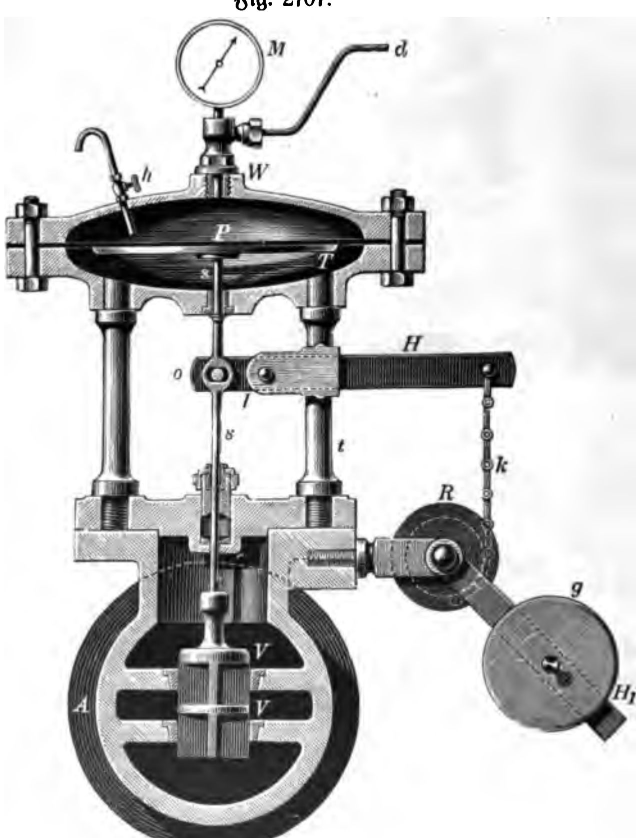


Ein Reduzierventil, wie es an Flaschen mit komprimiertem Sauerstoff gebraucht wird, ist dargestellt in Fig. 2703 [1]).

Es wird durch diese Laboratoriumsversuche der Übergang hergestellt zur Besprechung der Druckregulatoren für Gas- und Dampfleitungen [2]).

Größere Gasdruckregulatoren sind gewöhnlich den Gasmotoren vorgeschaltet [3]).


Fig. 2707.



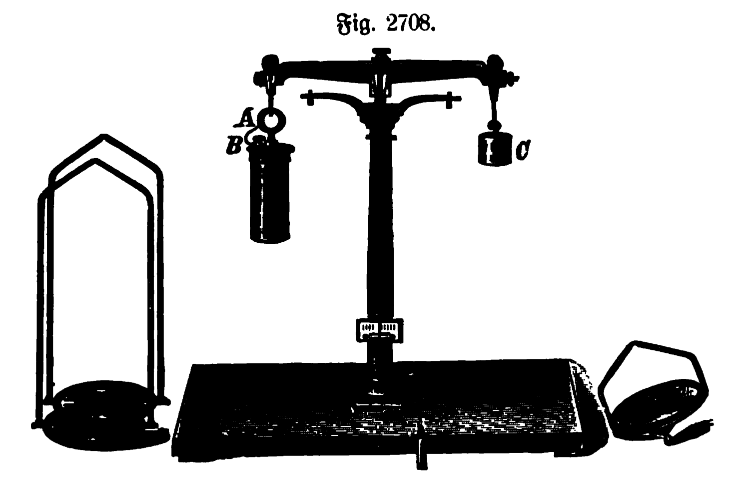
Drei verschiedene Arten von Dampfdruckreduzierventilen sind in den Figuren 2705, 2706 und 2707 dargestellt. Bei der ersten Figur tritt der Dampf durch das Rohr rechts ein und findet durch das Doppelsitzventil seinen Ausgang in das Rohr links. Der in letzterem herrschende Druck wirkt auf den Kolben am Stiele des Doppelsitzventils und schließt letzteres, sobald der Druck größer wird als der Druck der Atmosphäre + dem durch den einarmigen Hebel ausgeübten Druck. Bei der zweiten Figur tritt der Dampf auf der linken Seite ein, tritt durch die Bohrungen des Ventilkolbens in den Hohlraum des letzteren und von hier in die auf der rechten Seite sich anschließende Rohrleitung. Wird in dieser der Druck zu groß, so hebt sich der Kolben, der Durchgang des Dampfes durch die Bohrungen wird erschwert und somit muß der Druck wieder sinken, d. h. er bleibt auf nor-

[1]) Zu beziehen von der Sauerstofffabrik Berlin, G. m. b. H., Berlin N., Tegelerstraße 25. — [2]) Verschiedenartige Gasdruckregulatoren liefert Dr. H. Rohrbeck, Berlin NW., Karlstr. 20 a. — [3]) Fig. 2704 zeigt einen solchen. Zu beziehen von Simonis und Lanz, Frankfurt a. Main.

maler Höhe. Bei der dritten Figur ist eine in dem oberen Gehäuse angebrachte Membran dem Drucke des abströmenden Dampfes mittels des Röhrchens *d* ausgesetzt. Damit die Membran nicht Schaden leide, kommt sie nicht direkt mit dem Dampfe in Berührung, sondern bleibt mit Wasser bedeckt, welches auch das ganze Gehäuse über der Membran und auch das Röhrchen *d* erfüllt, so daß der Dampfdruck zunächst auf das Wasser wirkt, von welchem dann der Druck auf die Membran übertragen wird. Wird dieser Druck größer als der von untenher wirkende Druck der Atmosphäre und des Hebels, so baucht sich die Membran nach unten aus, schiebt also den Stiel des Doppelsitzventils hinunter, so daß der Zufluß des Dampfes vermindert wird. Letzterer tritt zwischen den beiden Tellern des Ventils ein und durch die beiden Räume darüber und darunter aus.

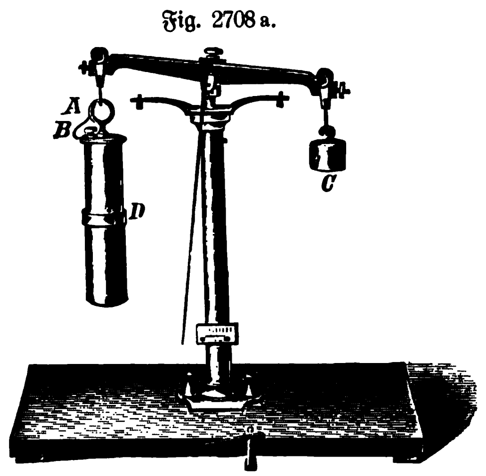
269. Auftrieb der Luft. Es ist zweckmäßig, zunächst den Versuch des **Aristoteles** vorzuführen, welcher beweisen sollte, daß Luft kein Gewicht hat. Man

Fig. 2708.



nimmt einen möglichst großen Kautschuksack, bläst ihn auf und tariert ihn auf der Wage. Sodann drückt man die Luft heraus und zeigt, daß das Gewicht ungeändert geblieben ist.

Fig. 2708 a.



Ähnlich wie man den Auftrieb, den ein Körper in einer Flüssigkeit erfährt, mittels der Wage und zwei genau ineinander passenden Metallcylindern zeigt, so läßt sich auch der Auftrieb durch die Luft mit Hilfe derselben Wage und des Baroskopes nach **Schoentjes** (1886) (Fig. 2708 und 2708 a Lb, 25) demonstrieren. Dasselbe besteht aus zwei hohlen Messingcylindern, welche auf der einen Seite geschlossen, auf der anderen offen sind und mit ihren offenen Seiten ineinander stecken. Am Deckel des inneren Cylinders ist ein Ring *A* angebracht und daneben eine kleine konische Öffnung, welche durch einen gleichfalls konischen Metall-

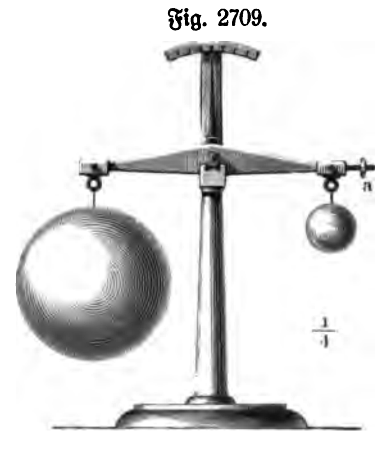
stöpsel B luftdicht geschlossen werden kann; dieser Stöpsel ist durch einen Seidenfaden am Ringe A festgebunden. Zum Apparate gehört ferner ein Gewicht C, welches den beiden Cylindern genau das Gegengewicht hält.

Zum Versuche werden die beiden Cylinder bei abgenommenem Stöpsel B ineinander geschoben, dann der Stöpsel B wieder fest aufgedrückt. Hängt man dann den Apparat an Stelle der einen Wagschale an die Wage, an Stelle der anderen Wagschale das Gegengewicht C, so ist die Wage im Gleichgewichte. Nun hängt man das Baroskop ab, zieht am Ringe A den inneren Cylinder so weit aus dem äußeren, bis die nahe am unteren Ende des inneren Cylinders angebrachte Feder über den oberen Rand des äußeren Cylinders greift; durch die Feder wird verhindert, daß die beiden Cylinder durch den äußeren Luftdruck wieder ineinander gedrückt werden. Hängt man jetzt den Apparat wieder an die Wage, so wird ihm durch C nicht mehr das Gleichgewicht gehalten: der Zeiger der Wage schlägt nach der Seite des Baroskops aus. Der Auftrieb ist somit größer geworden.

Ist die Grundfläche des inneren Cylinders $= g$, die Höhe, um welche die Cylinder auseinander gezogen worden sind $= h_1 - h_2$, das spezifische Gewicht der Luft $= s$, so ist der Auftrieb beim zweiten Versuche um $g\ (h_1 - h_2) s$ größer als beim ersten Versuche. Es ergibt sich, daß diese Größe etwa $= 0{,}17\ g$ ist. Durch Auflegen dieses Gewichtes auf die obere Platte des Baroskops kommt die Wage wieder ins Gleichgewicht. Anderseits muß sie aber auch ins Gleichgewicht kommen, wenn man soviel Luft zuläßt, als dem Volumen $g\ (h_1 - h_2)$ entspricht. Zu diesem Zwecke braucht man nur den Stopfen B zu lüften, worauf die Luft einströmt und die Wage wieder ins Gleichgewicht bringt. (Z. **14**, 166, 1901.)

Das Wagmanometer (Luftwage, Dasymeter, Baroskop). An eine feine, mit Stativ versehene kleine Wage, wie Fig. 2709, wird einerseits eine hohle, aus Glas oder dünnem Blech verfertigte, überall gut verlötete Kugel von etwa 4 bis 6 cm Durchmesser, anderseits eine massive Messingkugel angehängt, welche im lufterfüllten Raume ersterer das Gleichgewicht hält. Da aber dieses wegen Änderung des Luftdruckes nicht bleibend ist, so muß der eine oder der andere Wagarm eine Schraube als Verlängerung haben, damit man durch Drehen der Schraubenmutter a das Gleichgewicht herstellen kann. Man könnte hierfür auch einen leichten Sattel auf dem einen Wagebalken verschieben, obgleich dieses weniger bequem ist. Bringt man den Apparat unter den Rezipienten und zieht aus, so sinkt die größere Kugel, weil sie im lufterfüllten Raume mehr von ihrem Gewichte verliert als die massive. Hierfür ist es ganz besonders bequem, einen von der Luftpumpe abgesonderten Teller (Fig. 2592, S. 914) zu haben, der durch ein Kautschukrohr mit derselben verbunden wird, da nur selten eine Luftpumpe so fest steht, daß die Erschütterungen beim Auspumpen das Resultat des Versuchs nicht trüben.

Fig. 2709.



Otto v. Guerickes Dasymeter (1661) bestand aus einer kupfernen Kugel von etwa 1 Fuß Durchmesser, welche luftleer gemacht und am Ende eines empfindlichen Wagebalkens aufgehängt wurde, während das andere mit entsprechenden Ge-

wichten bis zum Gleichgewichte belastet wurde. Wurde nun die umgebende Luft dichter, so ging die Kugel in die Höhe, wurde sie dünner, so senkte sich die Kugel. Heller (1870) verbesserte das Instrument durch Anbringen eines Spiegels zur genauen Ablesung mit Fernrohr und Skala. Daß die Kugel luftleer sei, ist, wenn man nicht den ganzen Auftrieb der Luft messen will, unnötig. E. Schulze (1885) hängt einen cylindrischen Körper *K*, Fig. 2710, an einer Feder *F* in einem geschlossenen Glascylinder mit abgeschliffenem Rande auf, welcher nach Befettung des Randes auf einen ebengeschliffenen Glasteller aufgesetzt wird. Es genügt, die Luft in dem Gehäuse etwas zu verdichten oder zu verdünnen (eventuell mittels eines Kautschukballons), um den Körper zum Steigen oder Sinken zu veranlassen.

Fig. 2710.

Hier wäre auch zu erwähnen, daß sehr genaue Wägungen eigentlich im Vakuum ausgeführt werden müßten[1]).

270. Wägung der Luft. Zur Abwägung der Luft in einem Glasballon empfiehlt es sich, eine gewöhnliche Krämerwage (Tafelwage) zu benutzen, damit klar wird, daß das Gewicht der Luft gar nicht so unbeträchtlich ist und somit das Mißlingen der Wägung nach Aristoteles (S. 975) auf der Wirkung des Auftriebes beruht.

Fig. 2711.

Man benutzt dazu einen Glaskolben mit Hahn von etwa 8 bis 10 Liter Inhalt (Fig. 2711 Lb, 20). Der Gewichtsunterschied vor und nach dem Evakuieren beträgt etwa ebensoviel Gramm.

Will man genau das spezifische Gewicht einer Gasart in bezug auf atmosphärische Luft bestimmen, so wäre namentlich zu berücksichtigen, daß eine Wage, an welcher einerseits ein Ballon wie Fig. 2711, andererseits eine Tara aus Messinggewichten hängt, ein Dasymeter darstellt, also Resultate ergeben würde, die vom Barometerstand abhängen. Man vergrößert deshalb den Auftrieb der Gewichte, indem man als Tara einen geschlossenen Ballon von gleicher Größe nimmt mit Vorrichtung zum Auflegen der Zusatzgewichte. Ferner ist zu beachten, daß das zu wägende Gas getrocknet werden muß.

Wollte man das spezifische Gewicht der atmosphärischen Luft in bezug auf Wasser bestimmen, also den Ballon einmal mit Wasser füllen, so wäre besondere Sorgfalt auf das Wiederaustrocknen desselben zu verwenden, was ziemlich umständlich ist und nur durch wiederholtes Auspumpen und Anfüllen mit vollkommen trockener Luft erreicht werden kann. Schon darum eignet sich dieser Versuch nicht für den Schulunterricht.

Hat man kein mit einem Hahne versehenes Gefäß und will man nur den Gewichtsunterschied zwischen einem mit Luft erfüllten und einem luftleeren Gefäße zeigen, so kann man sich sehr leicht ein solches aus jedem dünnen Glase mit enger Mündung herstellen, indem man dasselbe mit einem gut schließenden Korke verschließt, welcher vorher mittels eines glühenden Drahtes 1 bis 2 mm weit durch-

[1]) Vakuumwagen liefern: P. Bunge, Präzisionswagen, Hamburg, Ottostr. 13; Wilh. H. F. Kuhlmann, Präzisionswagen, Hamburg, Steilhoperstr. 103; P. Stückrath, Werkstatt f. wissenschaftl. Instrumente, Berlin-Friedenau, Albestr. 11.

bohrt und dann eben geschnitten wird. Besser ist es, wenn man einen Kork von sehr reiner Schnittfläche aussucht, den man ganz eintreiben kann, weil es schwer ist, wieder eine so glatte Fläche zu schneiden, wie sie die Korke gewöhnlich haben. Man bindet dann ein Stück Wachstaffet darüber und macht in denselben auf beiden Seiten neben der Öffnung zwei parallele kleine Schnitte, wie dieses Fig. 2712 (und Fig. 2713 in größerem Maßstabe) zeigt. Man erhält so ein einfaches und gut schließendes Ventil. Das Gefäß wird behufs der Entleerung unter einen möglichst kleinen Rezipienten gestellt und aus diesem die Luft ausgepumpt, worauf man das Gefäß abwägen kann. Ein solcher Ballon braucht nur etwa $^1/_2$ Liter zu fassen. Wenn man nur eine Handluftpumpe hat, so kann man nach Varrentrapp die in Fig. 2714 in halber Größe abgebildete Vorrichtung benutzen. Das Ventil sitzt auf einem Korke in einer Glasröhre; die Glasröhre selbst wird durch die Röhre *a* in den Kork des auszupumpenden Gefäßes gesteckt und durch *b* mit der Luftpumpe verbunden. Steckt man *b* in das Gefäß, so kann der Apparat zum Komprimieren gebraucht werden. Die Korke können zur völligen Sicherheit mit Siegellack oder Siegellacklösung verkittet werden.

Fig. 2712.



Fig. 2713.



Fig. 2714.

Grimsehl (Z. 16, 288, 1903) macht darauf aufmerksam, daß man den Versuch auch ausführen kann, indem man aus einer größeren mit Glas- oder Quetschhahn versehenen Flasche Luft mit dem Munde heraussaugt, die Gewichtsabnahme bestimmt und sodann das Volumen der ausgesaugten Luft, indem man Wasser eintreten läßt.

Beispielsweise sind die spezifischen Gewichte bezogen auf Wasser gemessen bei 0° und 760 mm Druck unter 45° Breite:

Luft	0,001 293	Helium	0,000 177
Sauerstoff	0,001 429	Wasserstoff	0,000 090
Stickstoff	0,001 251	Kohlensäure	0,001 965
Argon	0,001 783	Kohlenoxyd	0,001 251

271. Leichte und schwere Gase. Man halte ein Zylinderglas mit der Mündung nach unten über einen geöffneten Gasbrenner und lasse es so mit Leuchtgas sich füllen. Entfernt man es nun und nähert eine brennende Kerze, so entzündet sich das Gas und brennt mit großer Flamme, namentlich, wenn man nun den Zylinder umkehrt. Man kann auch zeigen, daß, wenn das Glas schon einige Zeit vor dem Anzünden umgekehrt wird, die Zündung dann nicht mehr gelingt, da das Gas infolge seiner Leichtigkeit entwichen ist.

Hängt man ein großes Becherglas mit der Öffnung nach unten an die Demonstrationswage, tariert und läßt nun Leuchtgas einströmen, so wird es scheinbar leichter.

Aus einem mit Kohlensäure gefüllten Gefäß kann man die Kohlensäure in ein anderes Gefäß wie eine Flüssigkeit umgießen, ein Beweis, daß sie schwerer als die Luft ist. Besonders lehrreich ist dieser Versuch dann, wenn man das Gefäß, in welches man die Kohlensäure hineingießt, etwa ein großes Becherglas, auf eine Wage stellt. In dem Maße, als sich das Becherglas mit Kohlensäure füllt, senkt sich die Wagschale.

Will man die Versuche mit Kohlensäure im großen ausführen, so kann dazu die im Handel in großen schmiedeeisernen Flaschen (vergl. S. 568) zu beziehende flüssige Kohlensäure dienen. Beim Ausströmen aus solchen Flaschen bildet die Kohlensäure einen Strahl, mittels dessen man z. B. eine Reihe hintereinander aufgestellter Kerzenflammen zum Erlöschen bringen kann.

Ein sehr hübscher Versuch ist auch das Sichtbarmachen des Ausströmens oder Umgießens von Gasen mit Hilfe des Schlierenapparates oder einfacher durch Herstellung eines Schattenbildes auf einem entfernten Schirm unter Anwendung einer punktförmigen Lichtquelle (Bogenlampe ohne Glasglocke). Auch kann man durch farbige Gase, z. B. Bromdampf, den man durch Eingießen von etwas Brom in eine große Flasche erzeugt hat, das Ausströmen in Luft direkt zeigen, nur darf man den Versuch nicht im Zimmer vornehmen, sondern entweder im Freien oder unter einem gut ziehenden Abzug.

Brandstätter (Z. **13**, 16, 1900) empfiehlt als schweres Gas Schwefelkohlenstoffdampf. (Dichte gleich 2,64.) Derselbe ist allerdings sehr feuergefährlich, indem er sich schon an nicht glühenden, warmen Körpern entzündet. Gewöhnlich verwende ich deshalb Chloroformdampf.

272. Der Luftballon. Zu Versuchen im kleinen dienen am besten die kleinen Ballons aus Kollodium; sie steigen, wenn sie noch so klein sind. Man erhält solche Ballons, wenn man in einem bauchigen Glase mit etwa fingerweiter Öffnung und kurzem Halse von 180 bis 360 g Inhalt flüssiges Kollodium umschüttelt, bis es die Wände überall befeuchtet hat, und das überflüssige wieder ausgießt. Nach dem Trocknen löst man die dünne Haut vorsichtig vom Halse des Glases, bindet sie um eine dünne Glasröhre und saugt langsam die Luft aus, wodurch sich dann nach und nach die ganze Haut vom Glase löst und aus demselben gezogen werden kann. Man hat empfohlen, dem Kollodium 2 Proz. Glycerin beizumischen, um Rissigwerden zu verhindern.

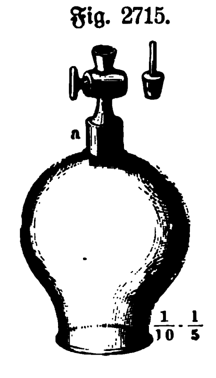
Rebenstorff (Z. **16**, 30, 1903) zieht die Kollodiumballons heraus, ehe sie völlig erstarrt sind, bläst sie weiter auf und läßt sie im aufgeblasenen Zustande trocknen. (Genauere Anweisung s. Sitzber. d. naturw. Ges. Isis, Dresden 1904.)

Größere Ballons werden aus Kautschuk oder Goldschlägerhaut hergestellt[1]), letztere besser direkt aus dem Amnion der Schafe, indem man dieses Häutchen mittels seiner eigenen Feuchtigkeit über einer mit Talg bestrichenen hölzernen Form zusammenklebt und trocknen läßt, worauf die Öffnung über einen Federkiel in wieder angefeuchtetem Zustande zusammengebunden wird. Flicken lassen sich die Ballons einfach dadurch, daß man mittels Speichel ein anderes Stückchen solcher Haut auf den Riß klebt. Ebenso wird die äußerste feine Haut vom Blinddarm der Ochsen behandelt, woraus eben die eigentliche Goldschlägerhaut gemacht wird.

[1]) Luftballons aus dünnem Kautschuk in den verschiedensten Formen sind zu beziehen von H. Lachambre, Paris, Vaugirard.

Um die Ballons zu füllen, bindet man sie an ein kurzes Stückchen Federkiel mit feinem Faden und richtet ein kleines Pfröpfchen aus Kork zum Verschlusse her. Das Wasserstoffgas sammelt man in einer Glasglocke, welche oben einen Hahn hat, Fig. 2715, sowie man sie zum Mischen der Gase, zum Füllen einer Schweinsblase u. s. w. gewöhnlich braucht.

Fig. 2715.



Hat man die erforderliche Quantität Wasserstoffgas und ist dieses gehörig abgekühlt, so streicht man mit der Hand alle atmosphärische Luft aus dem Luftballon, setzt ihn auf den Federkiel und drückt das Gas in denselben, indem man die Glasglocke langsam in die pneumatische Wanne einsenkt. Der gefüllte Ballon wird mit dem kleinen Korkstöpfelchen geschlossen und an einem Faden befestigt entlassen. Sollte er mit Wasser bespritzt worden sein, so muß er später aufgeblasen getrocknet werden. Direkt das Wasserstoffgas aus der Entbindungsflasche in den Luftballon zu leiten, geht nicht wohl an, weil es meist warm ist und darum zu viel Wasserdampf mitbringt, ganz abgesehen von mitgerissener Schwefelsäure. Wohl aber kann man dazu einen Gasometer verwenden oder eine Stahlflasche mit komprimiertem Wasserstoff, welche mit Reduktionsventil versehen ist (vergl. S. 568). (Bestimmung der Tragkraft durch angehängte Gewichte.)

Mit Leuchtgas steigen solche Ballons nur, wenn sie etwa achtmal so viel Gas fassen, als für Wasserstoffgas erforderlich ist.

Zur experimentellen Bestimmung der Steigkraft stelle ich einen mit Hahn versehenen auf einem Stativ befestigten Kollodiumballon auf die Schale der Demonstrationswage, tariere und ermittle nach der Füllung mit Leuchtgas, wieviel Zulagegewicht nötig ist, um das Gleichgewicht der Wage wieder herzustellen. Der Radius des kugelförmigen Ballons beträgt 8 cm, somit der Inhalt $^4/_3 . \pi . 8^3$, der Auftrieb, wenn das spezifische Gewicht des Leuchtgases $= 0{,}45$ gesetzt wird, $^4/_3 . \pi . 8^3 (1 - 0{,}45) . 1{,}2 . 10^{-3}$ g und die Steigkraft, da das Gewicht des leeren Ballons $= 0{,}9$ g ist, die Differenz dieser beiden Werte $= 1{,}42 - 0{,}9 = 0{,}52$ g $= 510$ Dynen.

Auch mit Leuchtgas aufgeblasene Seifenblasen steigen rasch in die Höhe. Um Seifenblasen mit Wasserstoff zu füllen, empfiehlt sich alkoholische Seifenlösung. Mit Kohlensäure gefüllte Blasen sinken herunter. Zur Erzeugung der Blasen kann man das Gas aus einem in einen kleinen Glastrichter endigenden Kautschukschlauch ausströmen lassen oder dasselbe zuvor in eine mit Hahn versehene Schweinsblase füllen. Sobald die Seifenblase etwa 3 cm groß geworden, schließt man den Hahn, hält das Röhrchen nach oben und sucht durch schwaches Rütteln die Blase zu lösen.

273. **Aerostatische Wage.** Lommel hängt einen geschlossenen Glasballon an einem feinen Draht an ein Ende eines Wagebalkens und tariert ihn. Er hängt im Inneren eines größeren, geschlossenen Glasgefäßes, durch dessen Deckel der Aufhängedraht lose durchgeht. Wird nun dieses Gefäß durch einen seitlichen Tubulus mit einem anderen Gase gefüllt, so wird das Gleichgewicht gestört. Die Menge Gewichte, die nötig sind zur Wiederherstellung, entsprechen der Differenz des Auftriebs in Luft und in dem Gase. (S. a. Haas, Z. 9, 184, 1896.)

Bei Anwendung eines aus einem großen Glaskolben hergestellten Ballons, welchen man in ein Gefäß mit Chloroformdampf eintauchen läßt, wird der Versuch sehr auffällig.

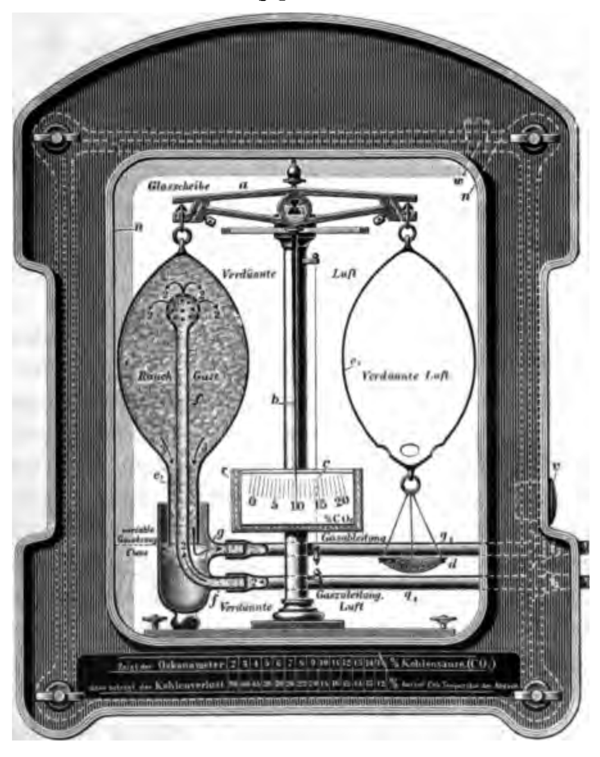
Métral (La nature 1, 66, 1900) zeigt, daß der Auftrieb eines Glasballons, welcher in Kohlensäure eintaucht, wieder kompensiert wird, wenn man auch in einen darüber befestigten, in Luft befindlichen gleich großen Kolben Kohlensäure einleitet.

Ein hübscher hierher gehöriger Versuch ist von Sire (1884) angegeben. Ein weites Glasgefäß, z. B. ein umgekehrt aufgestellter Luftpumpenrezipient, Aquariumglas[1]) u. s. w. wird mit Kohlensäure nahezu bis zum Rande gefüllt (z. B. durch Einbringen von Natriumbikarbonat, Weinsäure und etwas Wasser). Bringt man nun Seifenblasen hinein, so schwimmen dieselben auf der Kohlensäure. Statt der Seifenblasen könnte man auch einen Kollodium- oder Kautschukballon nehmen und denselben schon vor dem Einlassen der Kohlensäure in das Gefäß einlegen. Noch besser als Kohlensäure eignet sich Chloroformdampf. Hierher gehören auch die Gaswage von Lux[2]) (Fig. 2716) zur automatischen Bestimmung des spezifischen Gewichtes von Leuchtgas und Arndts Ökonometer[3]) (Fig. 2717), eine Gaswage zur fortlaufenden Untersuchung der Rauchgase auf Kohlensäuregehalt.

Fig. 2716.



Fig. 2717.



[1]) Sehr große Gefäße liefern Sievert u. Co., Dresden. — [2]) Zu beziehen von Dr. H. Rohrbeck, Berlin NW., Karlstr. 20a zu 200 Mk., Franz Müller in Bonn zu 300 Mk. und Muencke, Berlin, zu 805 Mk. — [3]) Zu beziehen zu 420 Mk. von Franz Müller in Bonn.

274. Gasniveau. Ein Rohrstück von der Form eines Y wird unten mit der Gasleitung an den beiden oberen Zweigen durch schief nach oben gehende Kautschukschläuche mit weiten Brennern verbunden, die sich höher und tiefer stellen lassen. Befinden sich die beiden Brenner auf gleichem Niveau, so brennen auch die beiden Gasflammen gleich hell, befinden sie sich dagegen auf ungleichem Niveau, so brennt die höher stehende heller, eventuell lischt die andere ganz aus. Es sollen sich nach Neyreneuf (1882) selbst Niveauänderungen um Bruchteile eines Millimeters erkennen lassen. Durch einen an den gaszuführenden Schlauch angelegten regulierbaren Quetschhahn muß dafür gesorgt werden, daß das Gas nicht unter Druck, sondern nur infolge seiner Leichtigkeit ausströmt.

A. W. Hofmann leitet zu gleichem Zwecke Wasserstoff durch eine horizontale Röhre von nachstehender Form (Fig. 2718); obschon *a* offen ist, entweicht der Wasserstoff durch *b*.

Diese Röhre eignet sich auch sehr gut für Leuchtgas. Die Zuflußröhre muß wesentlich enger sein als *a* und *b*, die etwa 2 cm weit sind. Dreht man die Röhre um ihre Achse, so erscheint die Flamme abwechselnd bei *a* und *b*.

Dvořak (Z. 15, 33, 1902) demonstriert das Gasniveau mittels zweier Metallröhren von 12 mm Durchmesser, welche durch Kautschukschläuche mit einem T-Stück verbunden sind, das an die Gasleitung angeschlossen wird. Hebt man die eine Flamme wenig, so wird sie sofort größer, während die andere kleiner wird. Auch ein gasgefüllter Schlauch ohne T-Stück genügt.

Fig. 2718.

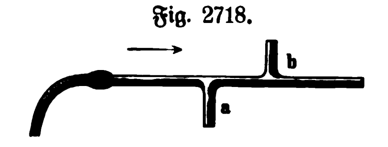
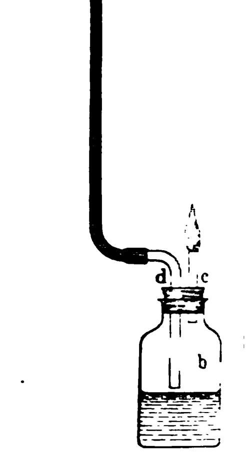


Fig. 2719.



Fig. 2720.



U. Behn (Z. 16, 132, 1903) verwendet einfach ein weites horizontales Messingrohr mit zwei weiten Öffnungen; Warburg (Z. 14, 95, 1901) einen Argandbrenner, welcher sich an einer Schnur auf etwa 4 m heben läßt und in der tiefsten Lage nur mit blauer Flamme brennt. Die Druckzunahme beträgt hier etwa 3 mm Wasserdruck und wird sehr gut sichtbar, wenn man den Gasdruck durch eine Mariottesche Flasche (nicht mittels eines Gashahnes) auf etwa 10 mm herabsetzt, so daß der Brenner in der tiefsten Lage nur eben mit blauer Flamme brennt.

Nach Niemöller (Z. 8, 303, 1895) zeigt ein Wassermanometer, welches man bei geschlossenem Haupthahn an die Gasleitung angeschlossen hat, eine Druckzunahme infolge des Auftriebs, sobald unten im Gebäude ein Gashahn geöffnet wird.

Brandstätter (Z. 7, 183, 1894) demonstriert die Schwere des Ätherdampfes durch eine Art Gasheber, welcher in den Fig. 2719 und 2720 in zwei ver-

schiedenen Formen dargestellt ist. Die Flaschen enthalten Äther, der Heber besteht im ersten Falle aus Glas, im anderen aus einem Kautschukschlauch.

Wird das Glas *b* tiefer gehalten als *a*, so fließt der Ätherdampf aus *a* durch *dd* nach *b* und wird hier an der Röhre *c* entzündet. Das Flämmchen ist um so größer, je größer der vertikale Abstand beider Gläser ist. Hebt man die Flasche *b*, so wird das Flämmchen immer kleiner und erlischt, sobald sich beide Flaschen auf gleicher Höhe befinden; wird *b* noch weiter gehoben, so fließt der Ätherdampf nach *a* und kann nun dort entzündet werden.

Fr. C. G. Müller (Z. 8, 359, 1895) verbindet eine große Glasflasche durch einen langen Schlauch mit einer am Ende geschlossenen, mit Seifenlösung ausgeschwenkten geteilten Glasröhre, in welcher sich eine Seifenlamelle befindet. Wird die Flasche höher oder tiefer gestellt, so schiebt sich diese vor oder zurück. Schon 1 dm Erhebung genügt.

Mit seiner S. 962 beschriebenen Drucklibelle vermochte Fr. C. G. Müller Ausschläge schon bei Erhebung der Flasche um 1 cm deutlich zu beobachten.

Zu messenden Versuchen verbindet Fr. C. G. Müller (Z. 2, 275, 1889) seine Drucklibelle durch einen Kautschukschlauch mit einem vertikal eingespannten 20 mm weiten und 120 mm langen Glasrohr, welches mit dem zu untersuchenden Gase, z. B. Kohlensäure oder Wasserstoff gefüllt wird. Wasserstoff gibt an der Drucklibelle 202 mm Ausschlag, Kohlensäure 115 mm.

Ford (Physik. Zeitschr. 1, 574, 1900) läßt in einer Waschflasche Gas von konstantem Druck unter einer Absperrflüssigkeit abströmen und senkt die Zuleitungsröhre so tief ein, daß gerade keine Gasblasen mehr aufsteigen. Von dem zweiten Rohre der Waschflasche führt ein Schlauch zu einer nicht zu kleinen Kochflasche, von welcher ein längerer Schlauch ausgeht, welcher mit dem gleichen Gase wie die Kochflasche gefüllt ist. Ist das zweite Gas schwerer als Luft, so wird der Gasstrom in der Waschflasche bei einem Senken des Schlauchendes wieder auftreten, ist es aber leichter, so geschieht dies beim Heben desselben. Unter Umständen genügt schon eine Höhenverschiebung des Schlauchendes um 1 m. Bei einer Abänderung des Versuches wird eine Mariottesche Flasche benutzt, welche ganz schwach fließt und an das freie Ende der Röhre der lange Schlauch befestigt, dessen Ende einen Trichter trägt, in welchen man das zweite Gas einleitet.

275. Homogene und inhomogene Gase. Nicht homogene gasförmige Körper sind Nebel und Rauch; ersterer ist Gas mit feinen Flüssigkeitströpfchen, letzterer Gas mit feinen suspendierten festen Stäubchen. Das spezifische Gewicht ist größer als das von reiner Luft. Ebenso ein suspendiertes Tröpfchen oder Stäubchen. Nebel und Rauch sind deshalb spezifisch schwerer als reine Luft. Die genaue Erklärung kann erst in der Dynamik gegeben werden.

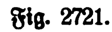
Durch Einleiten eines Sonnenstrahls in ein dunkles Zimmer kann man zeigen, wie auch die scheinbar ganz reine Zimmerluft zahllose sogenannte Sonnenstäubchen enthält.

Um die Luft von Staub zu befreien (filtrieren), leitet man sie durch ein mit mit Glycerin getränkter Watte vollgestopftes Glasrohr hindurch.

Undurchsichtige Seifenblasen erhält man nach Brenemann, indem man Luft erst durch Salpetersäure, dann über (nicht durch) Ammoniak in einer Woulfschen Flasche leitet und damit Seifenblasen erzeugt.

Eine **Fliege**, welche in einer auf einer Wage tarierten Flasche schwebt, bringt eine Gewichtsvermehrung hervor, gleichgültig, ob die Flasche offen oder geschlossen ist.

276. Luftdruckakkumulator. In gleicher Weise wie mittels Druckwasser in dem hydraulischen Akkumulator Energie aufgespeichert werden kann, ist dies möglich mittels Druckluft bei dem Druckluftakkumulator [1]). Die Einrichtung beider Apparate ist im wesentlichen dieselbe.


Fig. 2721.

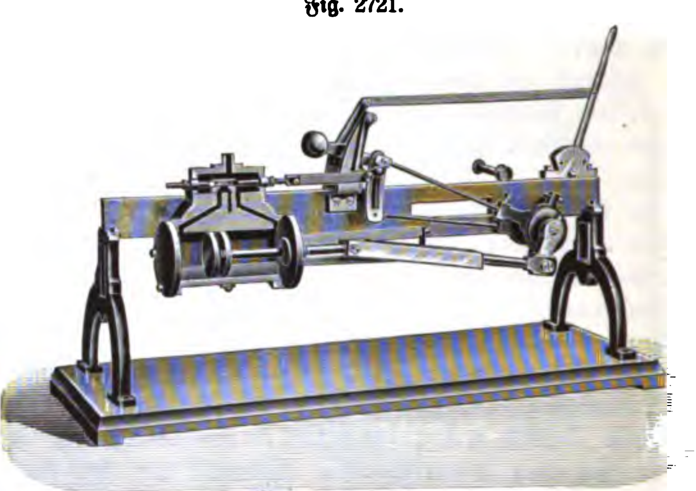
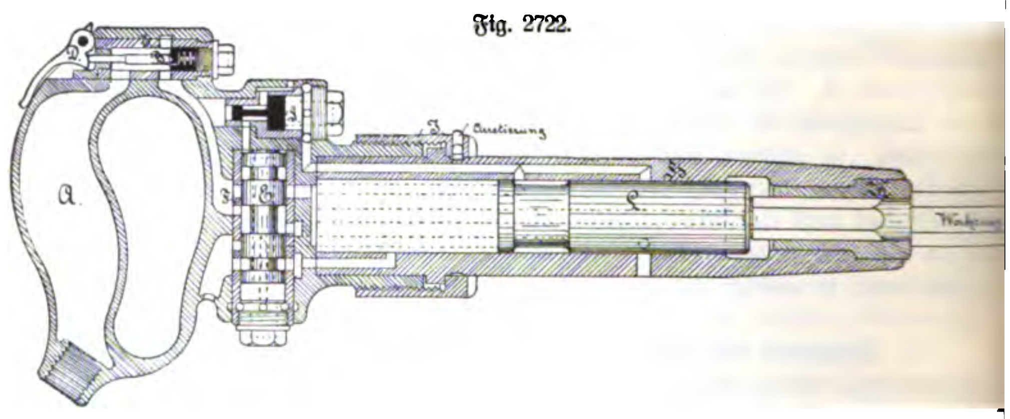


Fig. 2722.



277. Die pneumatischen Motoren. Die Einrichtung der Luftdruckmotoren, durch welche sich die aufgespeicherte potentielle Energie ausnutzen, somit eine pneumatische Kraftübertragung in die Ferne herstellen läßt, ist dieselbe, wie die der oben erwähnten Schieberpumpen zur Verdichtung der Luft. Ein Modell der Umsteuerung zur Änderung der Umlaufsrichtung des Motors zeigt Fig. 2721 (E, 225).

Fig. 2722 zeigt die innere Einrichtung eines **Preßlufthammers** von **de Fries u. Co.** [2]).

[1]) Früher zu beziehen von **Breuer, Schumacher u. Co., Akt.-Ges., Kalk** bei Köln. Eventuell kann zur Demonstration ein hydraulischer Akkumulator (s. S. 127 u. 1..) dienen. — [2]) **Preßluftwerkzeuge** verschiedener Art liefern **de Fries u. Co., Akt.-Ges.**, Düsseldorf; **F. G. Glaser**, Berlin SW., Lindenstr. 80 und **H. Glaenzer u. Perreaud**, **Paris**, Av. de la Republique.

Dem Prospekte entnehme ich folgendes:

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, wird der Handgriff *A* in hinten geschlossener Form hergestellt, die sich der Hand des Arbeiters bequem anpaßt. Das Einlaßventil *B*, das sich in einer Führungsbüchse *C* bewegt und durch Druckluft ausbalanciert ist, wird durch den Drücker *D* spielend leicht betätigt. Das Verteilungsventil *E* ist senkrecht zur Längsachse des Hammers eingebaut. Dasselbe ist cylindrisch ausgebildet und mit breiten Einschnürungen versehen, die dem Triebmittel ungehinderten Durchgang gestatten; es arbeitet in einer, im Griffkörper eingepreßten Stahlbüchse *F*. Das Steuerungsventil *G* bewegt sich ebenfalls in einer Stahlbüchse. Sämtliche Ventile sind leicht zugänglich und können jederzeit bequem und schnell nachgesehen oder ausgewechselt werden, ohne daß ein Auseinandernehmen des Hammers erforderlich wird. Der Arbeitscylinder *H* ist durch die mit Arretierung versehene Überwurfmutter *J* mit dem Handgriff *A* fest verschraubt, wobei das Cylinderende weit in den Handgriff eingefügt ist, so daß eine äußerst solide Verbindung gewahrt bleibt. Im unteren Cylinderende befindet sich eine gehärtete Stahlbüchse *K*, die zur Aufnahme des Werkzeugschaftes dient. Der Schlagkolben *L* ist aus bestem Gußstahl hergestellt, gehärtet und sauber geschliffen.

Der beim Rückgang des Schlagkolbens auftretende Rückschlag wird nicht nur durch ein Luftkissen aufgenommen, das durch verbrauchte Druckluft gebildet wird, sondern auch durch die Anordnung des Steuermechanismus im günstigsten Sinne beeinflußt, indem die dadurch bedingte große Beweglichkeit des Druckverteilungsventils das Triebmittel gerade in dem Augenblicke auf den Schlagkolben zur Wirkung bringt, wo der Rückschlag sich fühlbar zu machen beginnt.

Als Modelle von Druckluftmotoren können Wassermotoren, Dampfmaschinenmodelle, sowie auch manche Formen von Luftpumpen gebraucht werden [1]).

278. Windkessel. Infolge der hohen Kompressibilität der Gase läßt sich ein pneumatischer Akkumulator auch herstellen ohne Hebung eines Gewichtes, wobei zunächst unentschieden gelassen werden muß, in welcher Form hier die Energie aufgespeichert ist [2]). Zur Demonstration verwende ich einen großen eisernen Kessel, in welchem die Luft mittels des Kompressors auf 8 Atm. verdichtet wird. Setzt man ihn mit einem Druckluftmotor in Verbindung, so kann die aufgespeicherte Energie ebenso wie von einem Federmotor zurückerhalten werden.

Klarer liegt die Sache, wenn der Kessel durch die Schieberluftpumpe evakuiert wird. Scheinbar ist dann in dem Vakuum Energie aufgespeichert, denn der evakuierte Kessel vermag ebenfalls (durch Saugen) den Druckluftmotor zu treiben. In Wirklichkeit ist der Fall genau analog der Energieaufspeicherung durch Einblasen von Luft in einen unter Wasser liegenden Kautschukbeutel [3]). Derselbe bläht sich auf, verdrängt Wasser, erhöht also den Wasserstand und erzeugt potentielle Energie, welche ihren Sitz in dem gehobenen Wasser hat. Ebenso wird bei Evakuierung des Windkessels die äußere Luft gehoben. Dort ist also der wirkliche Sitz der potentiellen Energie. (Vgl. auch Lokalisierung der Energie, S. 727.)

Zur Aufspeicherung größerer Energiemengen auf kleinem Raum sind starke

---

[1]) Luftdruckmotoren für pneumatische Kraftübertragung liefern Riedinger, Augsburg und Popp, Paris. S. Prometheus 10, 54, 1899. — [2]) Die Erklärung wird erst in dem Kapitel Thermodynamik gegeben. — [3]) Schiffshebewerk, Trockendock.

Druckpumpen nötig (z. B. die in Fig. 2723 dargestellte Pumpe von Ratterer) und widerstandsfähige Stahlflaschen [1]).

Fig. 2723.



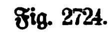


Fig. 2724.



279. Der Heronsball. Verdichtet man in einem Heronsball von Metall, dessen Springrohr durch einen Hahn verschließbar ist, wie in Fig. 2724, und der auf die Luftpumpe geschraubt werden kann (Fig. 2725 Lb, 40; 2726 E, 40; 2727 K, 39), die Luft, so können nach dem Abnehmen verschiedene Spritzöffnungen aufgeschraubt und die Wirkung der Druckluft gezeigt werden. Das Blech zu einem solchen Heronsball muß bei Messing mindestens 1 mm dick genommen werden und erträgt dann, wenn alles hart gelötet ist, bei nicht zu großen Dimensionen schon einen Druck von etwa 2 Atm. Hat die Luftpumpe kein besonderes Manometer, so muß man aus dem Volumen des Stiefels und dem noch mit Luft gefüllten Raume des Heronsballes die Kompression beurteilen. Gewöhnlich verdichtet man die Luft in dem Heronsball, indem man die Spitze in den Mund nimmt und hineinbläst (Fig. 2728 Lb, 0,80; 2729 Lb, 2,25) oder durch den Druck einer Wassersäule (Heronsbrunnen).

Die Zaubertonne (Fig. 2730 und 2731 K, 25) ist in zwei Teile geteilt und die Scheidewand hat oberhalb eine Öffnung. Durch das verschließbare Loch *a* wird *A* zur Hälfte mit Wein gefüllt, welcher durch den Druck der Wassersäule in der Röhre *CD* durch den Hahn *E* herausgetrieben wird, indem die Röhre *c* des Hahnes bis in den unteren Teil von *A* reicht. Die komprimierte Luft tritt durch die Öffnung der Scheidewand aus *B* in *A* und durch die verschließbare Öffnung *b* kann *B* nach dem Versuche entleert werden.

[1]) In Größen von 1 bis 500 Liter Wasserinhalt zu beziehen von Eduard Weiler, Maschinenfabrik, Berlin NW., Quitzowstr. 25/26.

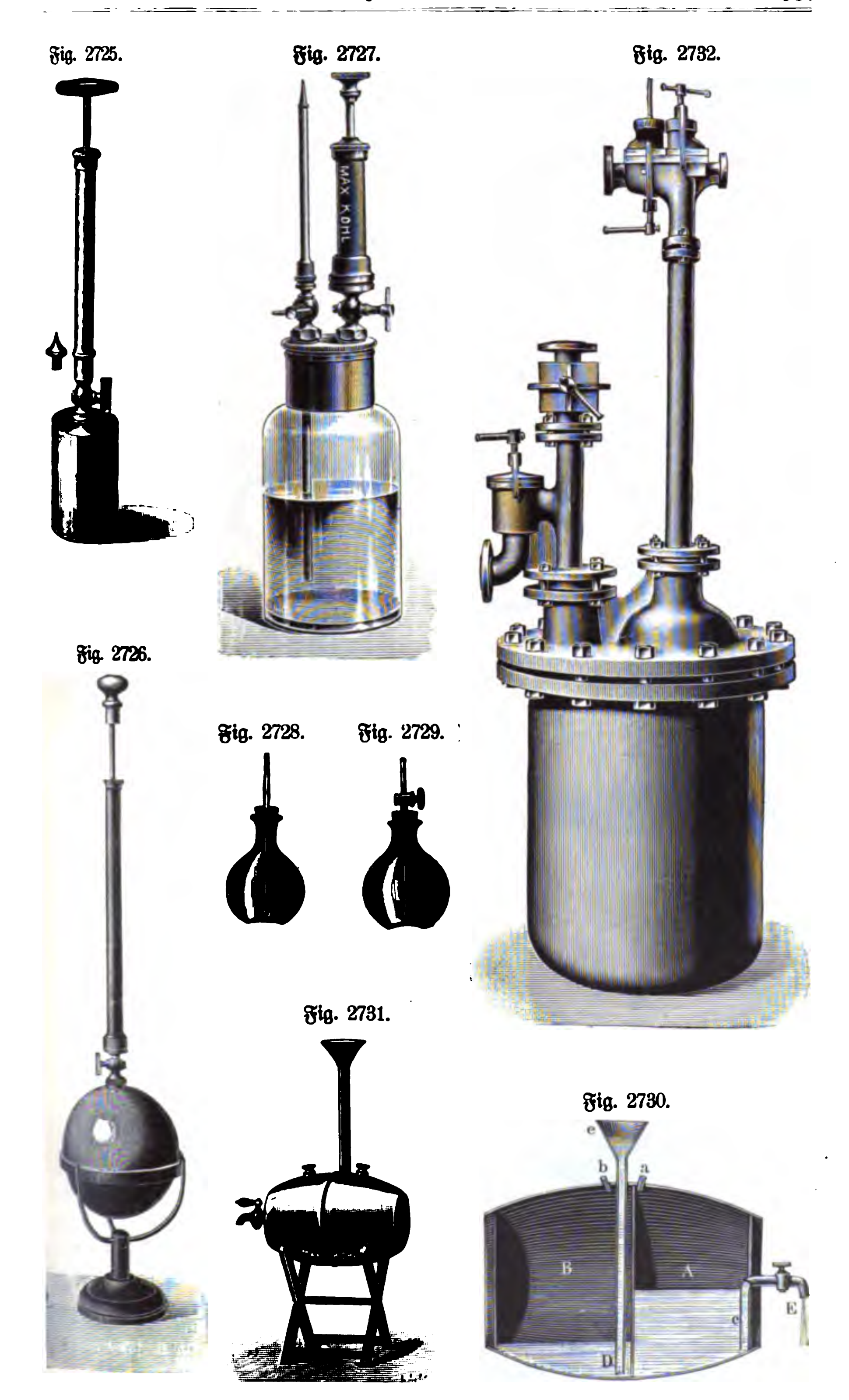


Fig. 2725.

Fig. 2727.

Fig. 2732.

Fig. 2726.

Fig. 2728.

Fig. 2729.

Fig. 2731.

Fig. 2730.

Anwendungen im großen sind das zur Emporförderung von Säuren u. s. w. dienende sogenannte Druckfaß oder Montejus[1]), sowie die Bierpressionsapparate, die allerdings neuerdings meist mit flüssiger Kohlensäure betrieben werden.

280. Die Mammutpumpe. Führt man in den einen Schenkel einer U-förmigen Wasser oder Quecksilber enthaltenden Röhre am unteren Ende Luftblasen ein, so steht natürlich in diesem Schenkel das Wasser höher und kann zum Auslaufen gebracht werden. Ist der andere Schenkel mit einem Wasser(-Quecksilber)-Behälter in Verbindung, so kann die Flüssigkeit aus diesem auf solche Art lediglich durch Einleiten von Druckluft in einen Behälter von höherem Niveau hinauf gefördert werden. (Vergl. Fig. 2626, S. 944). Auch in diesem Falle ist es scheinbar die in der verdichteten Luft aufgespeicherte Energie, welche die Arbeitsleistung vollbringt.

Fig. 2733.



Fig. 2734.

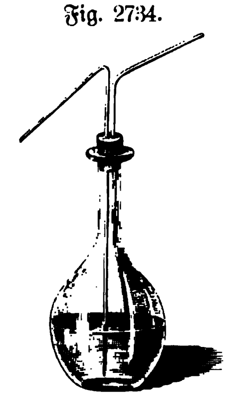
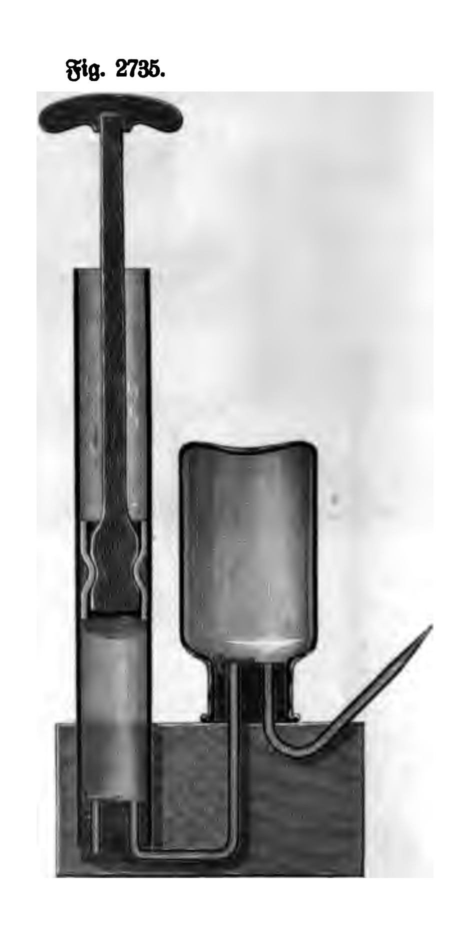


Fig. 2735.



281. Druckpumpen und Windkessel. Ein einfaches Modell einer solchen Pumpe zeigt Fig. 2733 (Lb, 11). Auch die Spritzflasche der Chemiker (Fig. 2734 Lb, 0,70 bis 1,20) wäre hier zu erwähnen.

---

[1]) Zu beziehen von de Dietrich u. Co., Niederbronn, Elsaß, und Friedr. Spies Söhne, Barmen-Rittershausen. Ein automatisches Druckfaß nach Fig. 2732 ist zu beziehen von Paul Schütze, Gießerei, Oggerstein (Pfalz).

Eine wie S. 897 angegeben selbst hergestellte Pumpe kann man leicht mit einem Heronsball versehen, indem man hierzu ein sogenanntes Opodeldokglas verwendet, wie Fig. 2735 zeigt.

Es wird zweckmäßig sein, den Apparat so in ein Klötzchen einzulassen, daß die Verbindungsröhren auf der Seite desselben aufliegen und sie, sowie den Pumpenkörper, durch ein paar Blechstreifchen darauf zu befestigen.

Hat man die Wirkung der Druckpumpe in Verbindung mit einem Heronsball erklärt, so handelt man die Anwendung derselben auf die Feuerspritze am besten an einer solchen selbst ab, statt ein Modell (Fig. 2736, Lb, 21) derselben anzuschaffen. Schafft man aber ein solches an, so muß auch der Heronsball aus Glas bestehen. Die Spritze sollte, damit man das Spiel der einzelnen Teile besser sehen kann, eine Saugspritze sein.

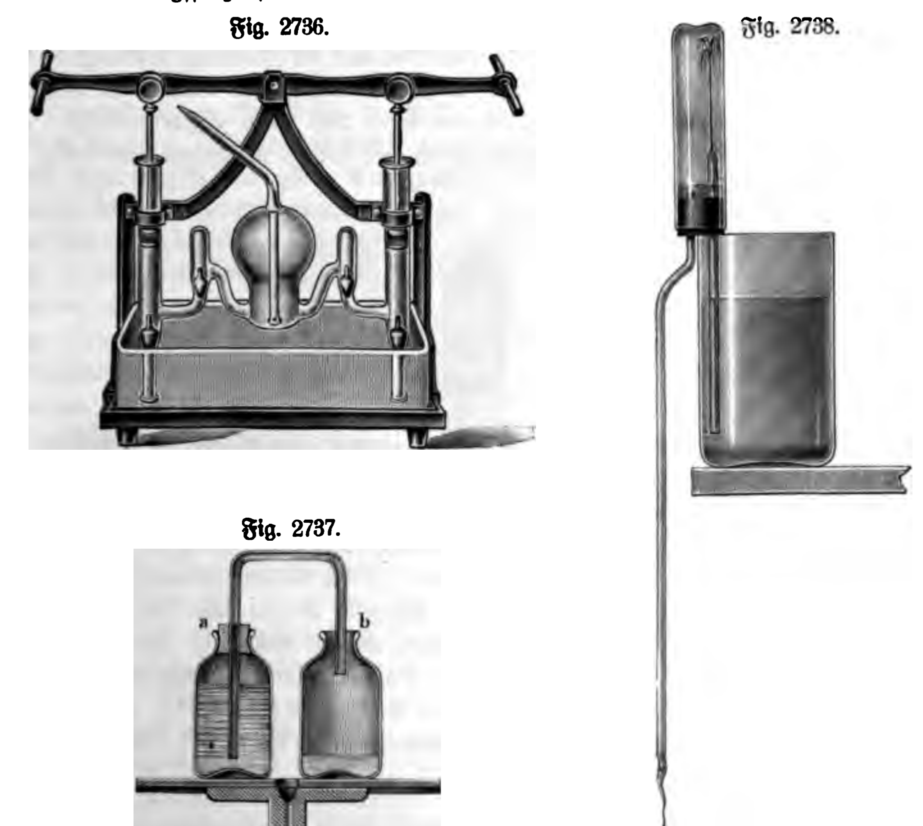


Fig. 2736.

Fig. 2737.

Fig. 2738.

282. Saugwindkessel. Statt die Luft im Heronsballe zu verdichten, kann man auch die äußere Luft verdünnen. Befestigt man mittels eines gut schließenden Korkes in einem zum Teile mit Wasser gefülltem Gefäße *a*, Fig. 2737, eine gekrümmte, beiderseits offene, in das Wasser reichende Glasröhre, deren anderes Ende in ein leeres Gefäß *b* reicht, und bringt den Apparat unter den Rezipienten einer Luftpumpe, so treibt die Elastizität der in *a* eingeschlossenen Luft beim Auspumpen das Wasser in das Gefäß *b*. Läßt man die Röhre gerade und zieht sie in eine Spitze aus, so hat man einen Heronsball der einfachsten Art. Man kann diesen unter dem Rezipienten zum Springen bringen, doch muß man sich dabei hüten,

den Versuch zu lange fortzusetzen, weil sonst Wasser in die Luftpumpe kommen könnte, was für andere Versuche störend ist.

Einen unterbrochenen Heber kann man sich einfach dadurch verschaffen, daß man von einem Kölnischwasserglase den Hals samt dem oberen Teile absprengt und durch einen guten Kork die beiden Heberröhren hineinführt, wovon die kürzere in eine Spitze ausgezogen ist und weiter hineinragt als die längere, Fig. 2738; saugt man den Heber an, und setzt dieses so lange fort, bis die Öffnung der längeren Röhre mit Wasser bedeckt ist, so hat man im Innern des Glases einen Springbrunnen.

Schnell laufende Pumpen (siehe Crickmer, Mech. Mag. Bd. LX, S. 106) werden auch mit einem Windkessel an der Saugröhre ausgerüstet. Es würde nämlich bei solchen die in Bewegung geratene Wassersäule beim Niedergange des Kolbens gegen das Ventil anstoßen und dessen Schließung erschweren. Ist nun aber ein Windkessel vorhanden, so kann sie in diesen eintreten und die schädliche Wirkung ist beseitigt. Man versieht den Windkessel außerdem mit einem Ventil, so daß die eingetretene Wassermenge nicht zurücksinken kann und beim Wiederaufsteigen des Kolbens der Eintritt des Wassers noch durch den Druck in diesem Windkessel gefördert wird.

Sechstes Kapitel.

Gase.

283. Expansion der Gase. Zusammendrückbarkeit (Kompressibilität) ist, wie bei den Flüssigkeiten besprochen, die Kompression bei Änderung des Druckes um 1 Einheit (gewöhnlich: 1 kg pro qcm, absolut: 1 Dyn pro qcm, technisch: 1 kg pro qm). Kompression bedeutet dabei das Verhältnis der Dichtigkeitszunahme zur ursprünglichen Dichtigkeit oder (was dasselbe ist) die Volumänderung pro Volumeinheit durch die Kompression. Während für feste Körper und Flüssigkeiten die Kompressibilität als eine Konstante betrachtet werden kann, ist dies bei Gasen keineswegs der Fall. Drückt man z. B. ein Gas vom Drucke p auf die Hälfte des ursprünglichen Volumens zusammen, so ist die Volumänderung $= 1/2$, das Volumen nach der Kompression $= 1/2$, somit die Kompression $= 1$ und die Kompressibilität $= \frac{1}{p}$, da dabei der Druck auf $2p$ erhöht werden mußte, also um p zugenommen hat. Die Kompressibilität ändert sich also mit dem Druck und ist das Reziproke desselben. Die Volumelastizität eines Gases ist demnach gleich seinem Druck.

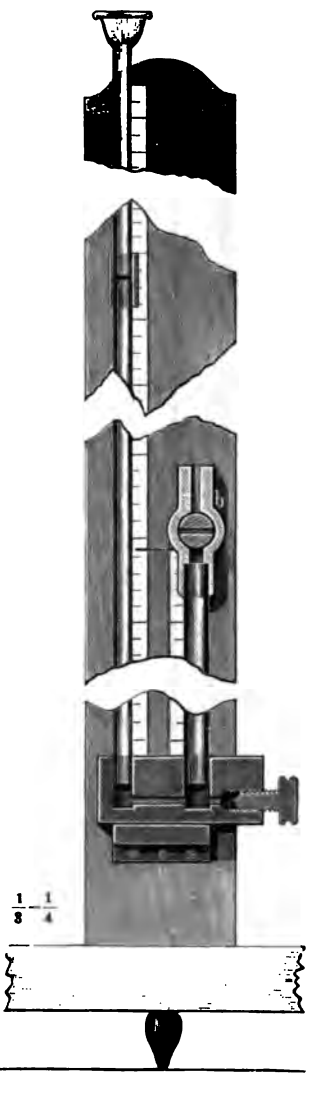
284. Boyle-Mariottes Gesetz. Um das Gesetz für die Verdichtung nachzuweisen, kann man sich eine wenigstens 1 bis 2 dcm vom Ende an gleich weite Glasröhre an diesem Ende zuschmelzen und heberförmig umbiegen, so daß der zugeschmolzene Teil den kürzeren Schenkel bildet. Diese Röhre wird mittels gebogener Messingstreifchen und Holzschräubchen auf ein Brettchen, wie Fig. 2739, befestigt, nachdem man vorher einen darauf geleimten Papierstreifen in Centimeter und Millimeter geteilt, von unten an beziffert und mit gebleichtem Schellack gefirnißt hat.

Eine solche Röhre braucht nicht gerade lang zu sein, 90 bis 100 cm sind genug, da sich das Gesetz durch Rechnung zeigen läßt, ohne daß man den Druck stets um ganze Atmosphären steigert. Will man dieses aber, so kann man leicht einige starke Glasröhren dadurch vereinigen, daß man sie mit Siegellack in eiserne Hülsen einkittet.

Bei dem Versuche selbst bringt man zuerst nur so viel Quecksilber in die Röhre, daß der gebogene Teil derselben gefüllt wird, und sucht durch wiederholtes Neigen und Aus- oder Einlassen kleiner Luftblasen in den verschlossenen Schenkel das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch zu bringen, etwa bis *ab*, welcher Stand notiert wird. Nun wird in den längeren Schenkel eine beliebig hohe Quecksilbersäule eingegossen; ist dadurch das Quecksilber im verschlossenen Schenkel bis *cd* gestiegen, so wird sich stets das frühere Volumen der Luft zum jetzigen verhalten wie der augenblickliche Barometerstand zu diesem + der Höhe des Quecksilbers über *cd*. Läßt es die Länge der Röhre zu, so kann man immer um ganze Atmosphären mit dem Drucke fortschreiten und dadurch das Volumen der Luft auf $^1/_2$ und $^1/_3$ reduzieren, wozu es dann bequem ist, wenn das ursprüngliche Volumen eine durch 2 und 3 teilbare Zahl von Centimetern beträgt.

Fig. 2739.

Fig. 2740.

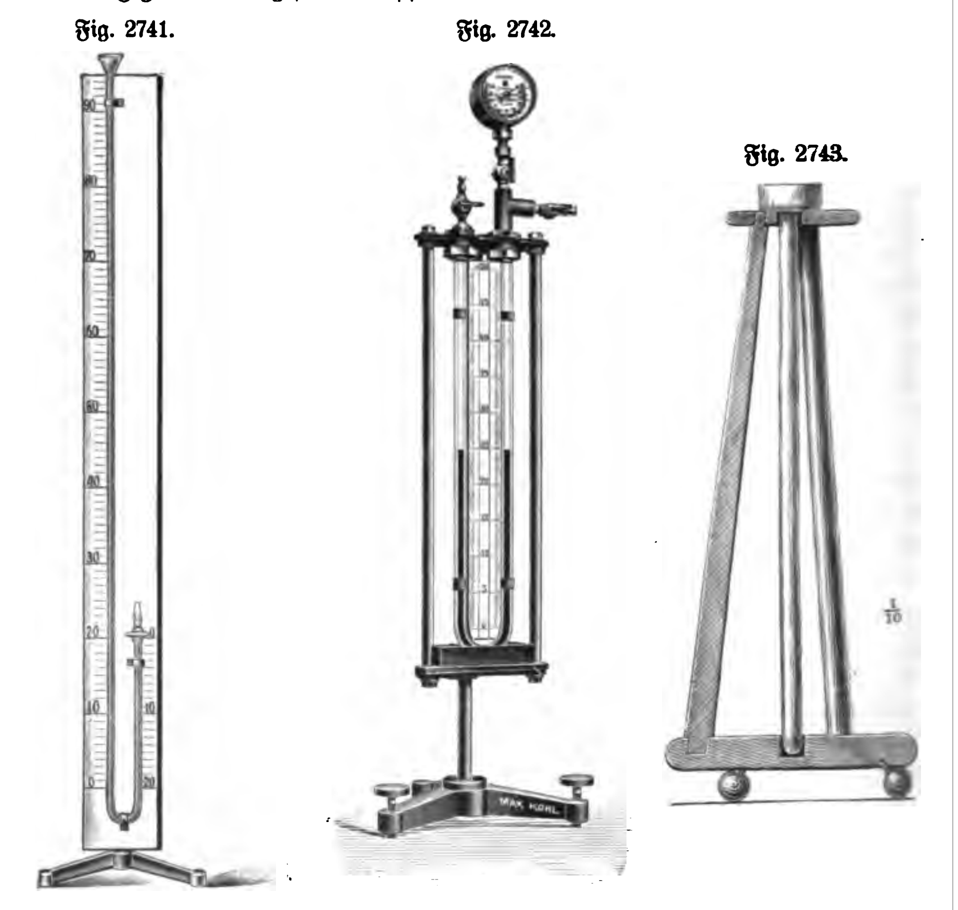


Sehr abgekürzt wird der Versuch, wenn das Instrument am Ende des kürzeren Schenkels einen gut schließenden Hahn hat, weil sich dann durch das einfache Öffnen des Hahnes das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch stellt. Es kann hier wohl ein messingener Hahn angewendet werden, da mit diesem das Quecksilber nur auf kurze Zeit an eingefetteten Teilen und ohne Druck in Berührung kommen kann; allein die Hülse des Hahnes muß so gebohrt werden, daß sie gerade so weit offen ist, als die Glasröhre selbst innen weit ist, und man muß bei der Ablesung bis zum Kegel des Hahnes zählen, dessen Stellung auf der Skala zu bezeichnen ist. Bei Röhren, welche mehr als 1 m lang sind, muß der kurze Schenkel aus einer besonderen Glasröhre bestehen und beide Schenkel werden in ein eisernes Querstück eingekittet, wie Fig. 2740 zeigt, damit man das Quecksilber hier entleeren kann, da bei langen Röhren das Ausleeren durch Umneigen nicht wohl angeht. Die Schraube muß gut in die Mutter passen und ihre Spitze als Kegelventil die Öffnung schließen; das Quecksilber fließt durch

eine von vorn eingebohrte ziemlich feine Öffnung aus, wenn die Schraube zurück gedreht wird. Der Apparat muß ein ziemlich großes, je nach der Höhe bis 3 dcm breites Standbrett erhalten. Die Stücke der langen Röhre werden dadurch vereinigt, daß man dieselben in kurze eiserne Zwingen kittet. Andere Apparate zu gleichem Zwecke zeigen die Fig. 2741 Lb, 20 und 2742 (K, 50).

Um dasselbe Gesetz für die Verdünnung nachzuweisen, nimmt man gewöhnlich den in Fig. 2743 dargestellten Apparat.

Fig. 2741. Fig. 2742. Fig. 2743.

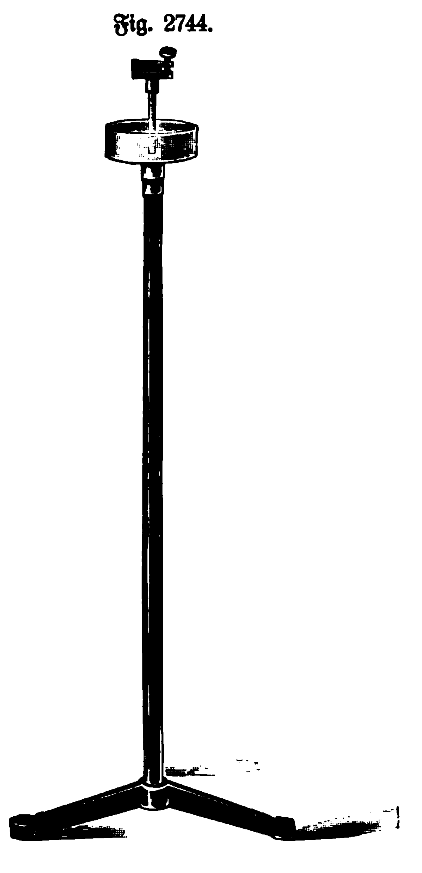


Die enge Glasröhre, welche beim Versuche gebraucht wird, schleift man auf einer Seite eben und teilt sie dann von da aus in Centimeter, indem man die Striche mit Tusche aufträgt oder sie mit dem Schreibdiamant einreißt; im letzteren Falle werden sie nachher mittels Ölfarbe eingeschwärzt. Beim Versuche steckt man sie in die weite, mit Quecksilber gefüllte Röhre, so daß sie nur noch um ganze Centimeter aus dem Quecksilber hervorragt, verschließt sie mit dem Finger und zieht sie nun weiter heraus, bis die Luft in der Röhre wieder eine beliebige ganze Zahl von Centimetern einnimmt, worauf man die Höhe der gehobenen Quecksilbersäule mißt. Man kann auch eine zugeschmolzene Röhre verwenden, sie nur bis auf einige Centimeter mit Quecksilber füllen und in das Gefäß umkehren; sie wird zuerst so weit eingetaucht, daß das Quecksilber innen und außen gleich hoch steht, wobei man dann die Länge der vorhandenen Luftsäule mißt; die Röhre wird dann beliebig

rausgezogen und die Länge der Luftsäule und der gehobenen Quecksilbersäule ieder gemessen. Wird das obere Ende der Röhre durch einen Hahn geschlossen, muß derselbe bearbeitet werden, wie *b* in Fig. 2740. Fig. 2744 (Lb, 25) zeigt ne Röhre mit einfacher Klemmvorrichtung statt des Hahnes. Ist die ursprüngliche änge der Luftsäule *l*, die zweite *l'*, *h* die gehobene Quecksilbersäule und *B* der arometerstand, so wird immer $l : l' = B - h : B$ sein.

Wesentlich bequemer als der beschriebene Apparat ist der Apparat von . Zeilitzsch, welcher sich sowohl für Verdünnung wie Verdichtung eignet. Die n ihrem oberen Ende mit Glas- oder Metall-ahn verschlossene etwa 1 m lange Glasröhre t unten mit einem umsponnenen Kautschuk-hlauch mit enger Öffnung, aber beträchtlicher Vandstärke, verbunden, dessen anderes Ende n ein trichterförmiges Glasgefäß angesetzt t, welches sich auf irgend eine Weise mittels nes verstellbaren Stativs oder mittels Rollen nd Schnüren durch eine Kurbel heben und nken läßt. Ist der Hahn offen, so stehen ie beiden Quecksilberniveaus stets gleich hoch, ird das Quecksilber auf wenige Centimeter om Hahn eingestellt, derselbe geschlossen und as Gefäß gesenkt, so beobachtet man die Druckänderung bei Verdünnung; wird um-ekehrt das Rohr fast ganz mit Gas gefüllt nd das Gefäß gehoben, so zeigt sich die Druckvermehrung bei Verdichtung. In letzterem alle muß man, falls der Hahn aus Glas efertigt ist, dafür sorgen, daß der Zapfen esselben nicht herausgeschleudert werden kann.

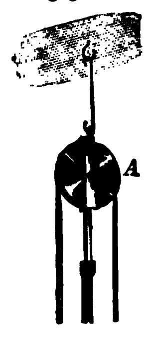
Fig. 2744.



Bequemer ist es, anstatt des langen offenen chenkels, wie bei der Quecksilberpumpe, ein eweglichеs Gefäß mit langem, engem Schlauch nit Einlage zu verwenden. Ich pflege das-lbe an den Aufzug im Auditorium anzu-ängen und damit 4 bis 5 m hoch zu heben. Um die Höhe messen zu können, wird gleichzeitig ein Bandmaß an den Auf-ug angehängt, so daß dessen Nullstrich in das Niveau des Quecksilbers im Ge-äße fällt.

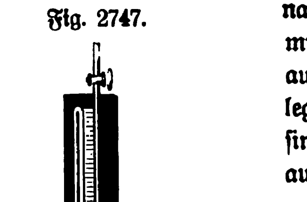
Einer ähnlichen Vorrichtung bedient sich Zakrzewski (Z. 14, 348, 1901) ig. 2745. Die durch einen Schlauch verbundenen Gefäße sind an einem endlosen ber Rollen geführten, durch eine Feder gespannten Stahlband befestigt. Der Schlauch ist ein dickwandiger mit Eisengarn umklöppelter Gummischlauch. Das Meßband in der Mitte läuft über zwei kleine Holzrollen, von welchen die obere urch zwei Spiralfedern angespannt wird. Der Nullpunkt der Teilung ist mit einem Zeiger versehen, welcher jede der beiden Glasröhren berühren kann. Der längs des Bandes verschiebbare Zeiger wird auf das am besten erreichbare Niveau eingestellt. Der Glashahn der Meßröhre ist durch eine Feder gegen Überdruck gesichert.

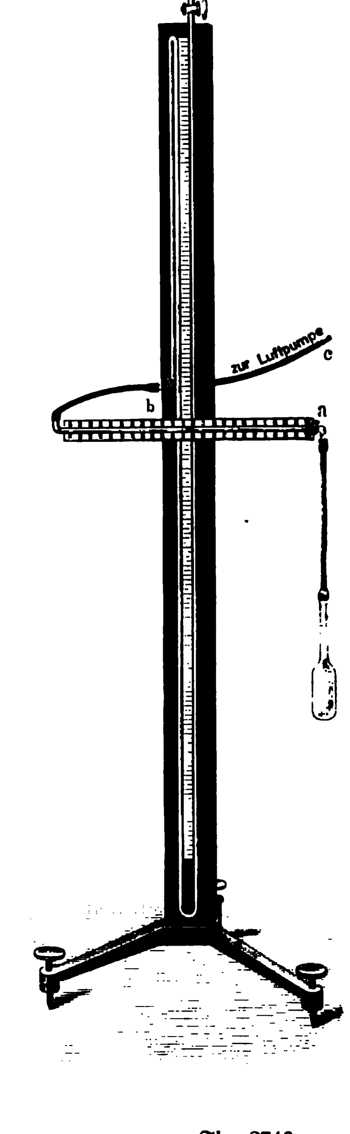
Fig. 2745.



Noack (Z. 15, 196, 1902) empfiehlt wie schon Melde (1887) und Maiß (Z. 13, 337, 1900) ein Kapillarrohr (Fig. 2746) von 2 mm innerer Weite und 105 cm Länge, welches durch Einkitten eines kurzen Stückchens Eisendraht mit Siegellack am einen Ende verschlossen wird. Der Druck auf das Gas wird ausgeübt durch eine eingebrachte Quecksilbersäule von 5 bzw. 10 cm Länge und dadurch geändert, daß man die Röhre einmal mit der Öffnung nach oben, das andere Mal mit der Öffnung nach unten aufhängt oder auch horizontal legt. Noch weitere Variationen sind möglich durch Auflegen auf eine schiefe Ebene.

Fig. 2747.

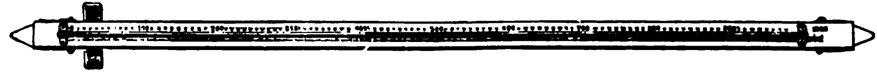




Einen anderen Apparat für das Mariottesche Gesetz beschreibt Fr. C. G. Müller (Z. 16, 18, 1903). Die Meßröhre in welcher das Gas durch einen Quecksilbertropfen abgesperrt ist, liegt horizontal. Die Messung des Druckes erfolgt mittels eines Quecksilbermanometers, welches auch durch ein empfindliches Federmanometer ersetzt werden könnte, und zur Erzeugung des Druckes wird eine gewöhnliche Hahnluftpumpe benutzt, mit welcher man auch Überdruck herstellen kann. Fig. 2747 stellt den Apparat dar. Der Hahn *a* ist geschlossen zu denken; der daran angebrachte Schlauch mit Glasgefäß dient zu später zu besprechenden Versuchen über thermische Ausdehnung der Luft. Der nach hinten gehende Dreiweghahn *b* ermöglicht die Verbindung mit dem Manometer und der Luftpumpe oder der Atmospäre.

U. Behn (Z. 16, 131, 1903) benutzt zur Erläuterung

Fig. 2746.



der graphischen Darstellung des Gesetzes den in Fig. 2748 dargestellten Apparat, den man sich leicht selbst herstellen kann.

Die horizontale Röhre *R* ist am Ende *C* geschlossen und der darin verschiebbare Kolben *E* durch die hohle Kolbenstange *rr*, welche bei *B* horizontal umgebogen ist, mit dem Quecksilbermanometer *mm* verbunden, das Drucke von 0,5 bis 2 Atm. angibt und aus einer Glasröhre von 3 mm Lumen besteht. Es ist an einem Schlitten befestigt, der leicht auf der Röhre *R* gleiten kann. Die Druckkurve kann an einer dahinterstehenden Tafel, wie die Figur zeigt, direkt aufgetragen werden.

Recht instruktiv erscheint es auch, das Gesetz nachzuweisen, indem man einen größeren mit komprimierter Luft gefüllten eisernen Kessel und einen evakuierten oder einen solchen mit Luft von anderer Dichte verbindet (Fig. 2749). An den Kesseln sind Federmanometer angebracht, aus deren Angaben der Druck nach der Verbindung berechnet werden kann.

Zur Ausführung des Versuches in kleinem Maßstabe kann der Glasapparat Fig. 2750 (K, 9,50) dienen, wobei der

Fig. 2748.

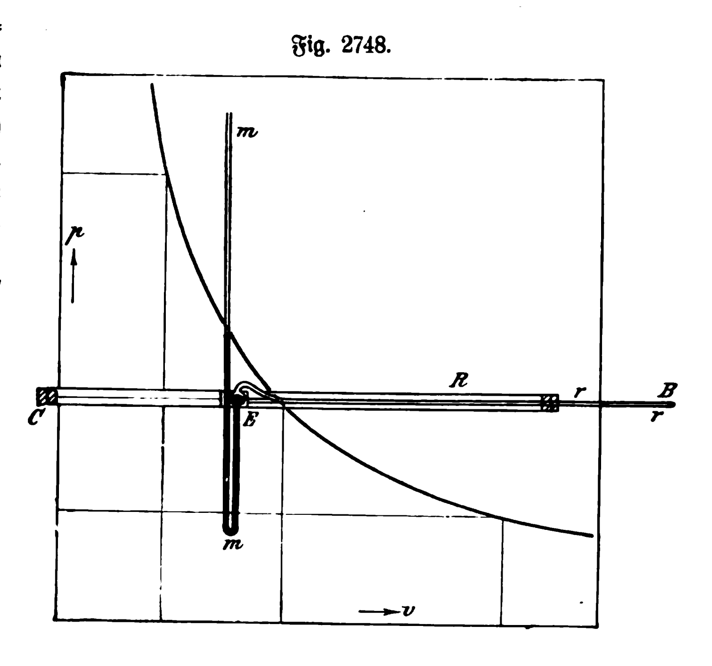
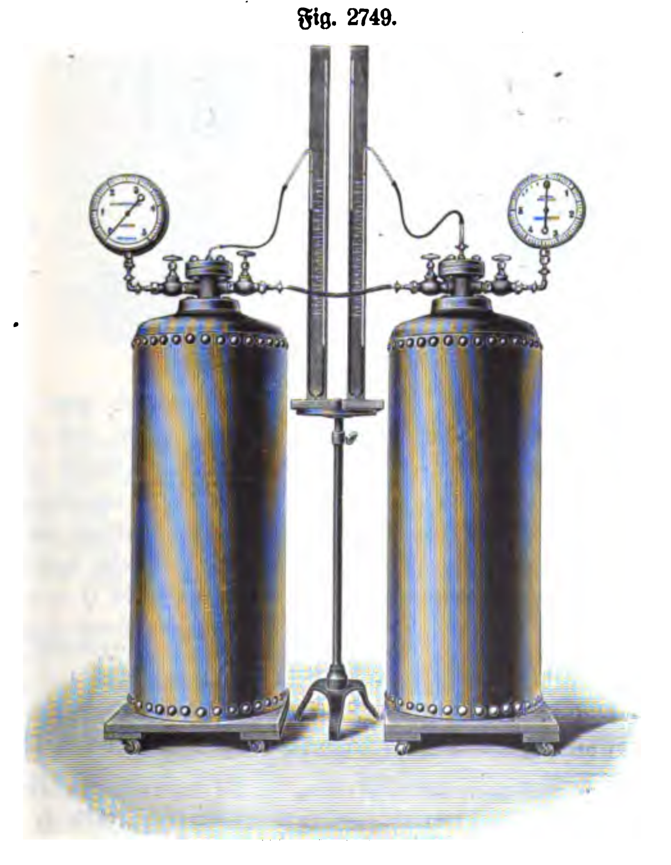


Fig. 2749.



freie Hahn mit einem Quecksilbermanometer in Verbindung zu setzen ist, nachdem man die Kugel evakuiert hat, während die andere mit Luft von gewöhnlicher Dichte gefüllt bleibt[1]).

M. Kohl liefert einen Kautschukballon in hölzernem Kasten mit lose eingepaßtem Deckel, welcher sich durch Auflegen von eisernen Platten beschweren läßt (Fig. 2751). Wenn auch der Versuch, insofern noch die Spannung des Ballons hinzukommt, nicht ganz rein ist, so macht er doch den Inhalt des Boyleschen Gesetzes sehr anschaulich.

Fig. 2750.

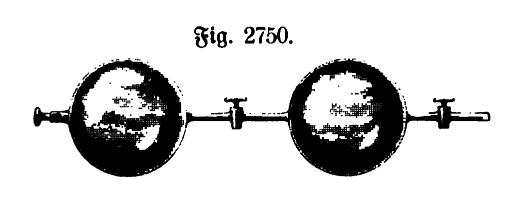


Fig. 2751.



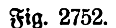
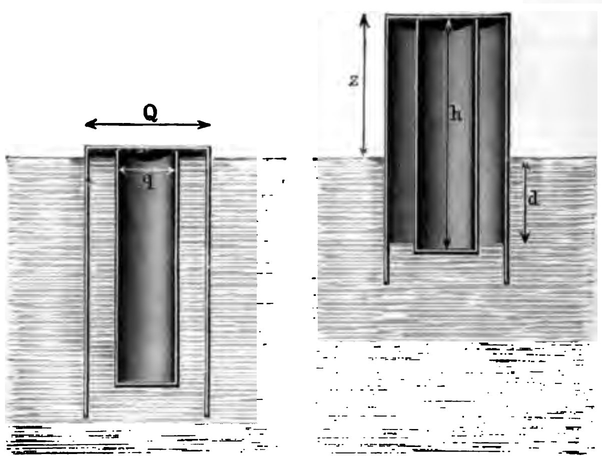


Fig. 2752.



285. Glockenmanometer. Das Gleichgewicht eines schwimmenden Gasbehälters (Glockengasometers) ergibt sich ebenfalls unter Berücksichtigung des Boyleschen Gesetzes[2]), ebenso das des Glockenmanometers, Fig. 2752. (Vergl. auch S. 964.) In der unten offenen cylindrischen Glocke vom Querschnitt Q, Fig. 2752, ist die geschlossene konaxiale Trommel C befestigt. Das Ganze taucht man in Wasser ein, so daß dieses, wenn der Körper schwimmt, d. h. der Auftrieb q gleich seinem Gewicht ist, außen und innen gleich hoch und nahe der oberen Kante steht. Wird der Druck des Gases in der Glocke vergrößert, so hebt sich diese um z bis der Auftrieb soweit verringert ist, daß das Übergewicht dem der entstehenden Niveaudifferenz d des Wassers innen und außen das Gleichgewicht hält. Die Verminderung des Auftriebs beträgt $q\ (z + d)$, der Druck infolge der Niveaudifferenz $Q.d$, somit muß sein $Q.d = q\ (z + d)$ oder $z = d.q\ (Q - q)$, d. h. die Glocke steigt bei gleichem Druck d um so höher, je größer die Differenz $Q - q$ im Verhältnis zu q.

286. Geschlossene Manometer. Geschlossene Manometer werden gewöhnlich nur bei höherem Drucke gebraucht, der Druck wird bei ihnen durch die Volumsverminde-

[1]) Hier kann die Besprechung der Verdünnungsgrenze einer Luftpumpe (siehe S. 999) angefügt werden. — [2]) Siehe Ritter, Lehrb. d. technischen Mechanik, Leipzig 1882, Baumgärtner, S. 682.

rung einer in einer Glasröhre eingeschlossenen Portion atmosphärischer Luft nach dem Mariotteschen Gesetze bestimmt. Fig. 2753 zeigt ein solches Manometer, welches auf die Gas- oder Dampfleitung oder auf den Dampfkessel aufgeschraubt werden kann, oder durch einen Hahn abschließbar mit den Röhren der Luftpumpe in Verbindung steht, wenn diese auch zum Komprimieren gebraucht werden soll. Es besteht in einem Gefäße *bb*, welches durch den Kanal *a* mit dem Gase in Verbindung ist und ein Gefäß mit Quecksilber enthält; in *bb* wird mittels einer metallenen Fassung eine starke Glasröhre von etwa 5 mm innerer Weite so eingeschraubt, daß sie bis in das Quecksilber reicht. Auf der Glasröhre ist eine Teilung nach Atmosphären.

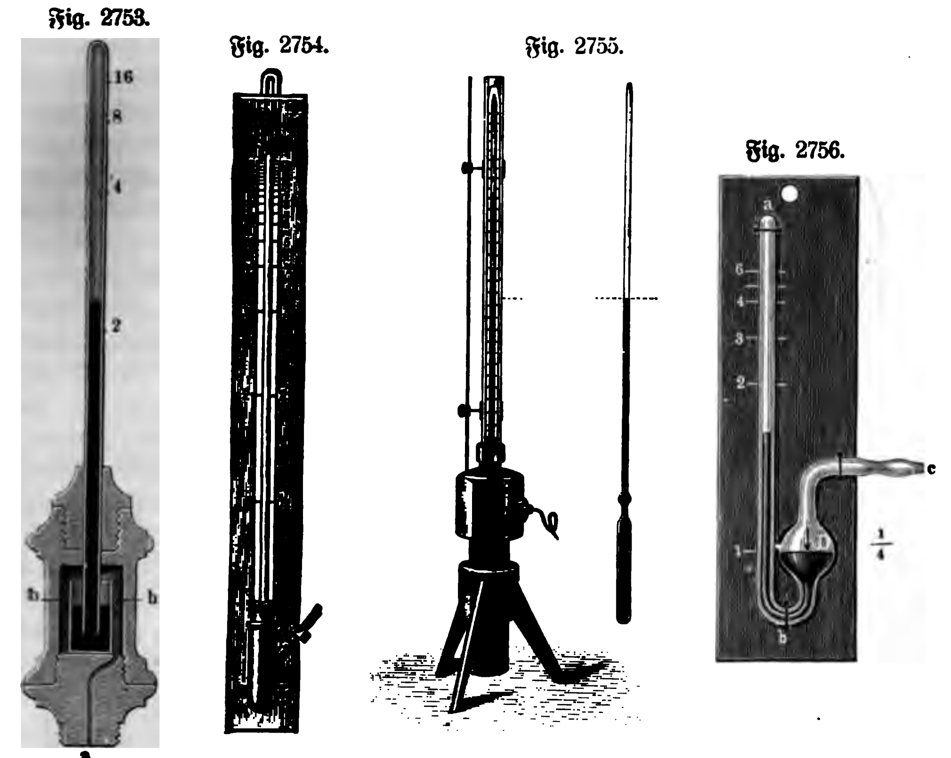


Fig. 2753. Fig. 2754. Fig. 2755. Fig. 2756.

Der Druck des Gases treibt das Quecksilber in die Höhe und muß dadurch die in der Röhre eingeschlossene Luft zusammenpressen; ist sie bis auf die Hälfte zusammengepreßt, so beträgt der Druck zwei Atmosphären u. s. w. Ich verwende ein solches Instrument mit einer Röhre von etwa 1 m Länge und 1 cm Weite. Statt des Quecksilbers wird gefärbtes Wasser benutzt.

Andere Formen zeigen die Fig. 2754 (Lb, 40), 2755 und 2756.

287. Inhaltsmesser (Finimeter), Fig. 2757 [1]), werden Manometer genannt, bestimmt zum Aufschrauben auf stählerne Flaschen mit komprimierten Gasen, aus deren Angabe nach dem Boyleschen Gesetze sich ohne weiteres erkennen läßt, wieviel Gas noch in der Flasche enthalten ist. War z. B. der anfängliche Druck 100 kg pro qcm und ist derselbe durch Auslassen von Gas auf 50 gesunken, so

[1]) Zu beziehen von der Sauerstofffabrik, Berlin N., Tegelerstr. 15.

ist die noch vorhandene Gasmenge die Hälfte der ursprünglichen. Um sich die Rechnung zu sparen, kann die Skala des Manometers so geeicht werden, daß sie direkt den noch vorhandenen Bruchteil der ursprünglichen Füllung oder dessen Gewicht in Kilogramm angibt.

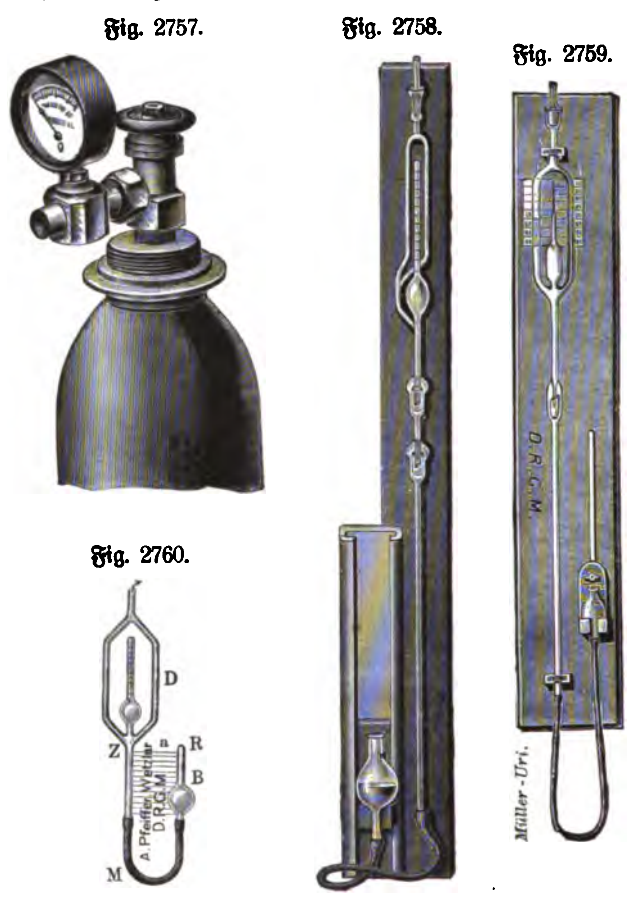


Fig. 2757. Fig. 2758. Fig. 2759. Fig. 2760.

288. Aragos (Mac Leods) Manometer. Verkleinert man das Volumen einer abgeschlossenen Luftmenge auf $^1/_{1000}$, so wird der Druck 1000 mal größer. War er also anfänglich $^1/_{1000}$ mm, so ist er nachher 1 mm, kann also an einem gewöhnlichen Manometer leicht abgelesen werden, während dies vorher nicht möglich war. Ein Manometer, welches gestattet, durch Heben eines Quecksilbergefäßes, wie bei der Quecksilberluftpumpe, diese Volumenverkleinerung vorzunehmen, zeigt Fig. 2758 (Lb, 35).

Die Steigröhre enthält Luftfallen, um Fehler durch aus dem Quecksilber aufsteigende Luftblasen zu vermeiden. Bei manchen Quecksilberluftpumpen läßt sich mittels des gebogenen Verbindungsrohres vom Rezipienten eine ähnliche Einrichtung improvisieren [1]).

Ein abgekürztes Vakuummeter beschreibt Reiff (Z. 17, 157, 1904). Kurz unterhalb des Meßsystems (Fig. 2760) wird der Schlauch angesetzt und das Gefäß bei (*B*) läuft oben in ein kurzes geschlossenes Rohr *R* aus. Gefäß und Rohr sind mit Quecksilber gefüllt. Wird nun evakuiert, so wirkt zunächst der Teil *ZMR* als Barometerprobe und die mäßigen Verdünnungen lassen sich an der Skala *aa* in Millimetern direkt ablesen. Sollen geringere Drucke gemessen werden, so hebt man das Gefäß *B* und die Messung wird auf dieselbe Weise wie vorhin mit unverkürztem Vakuummeter ausgeführt.

---

[1]) Ein Präzisions-Vakuummeter nach Fig. 2759 ist zu beziehen von Müller-Uri in Braunschweig. Der weite Rezipient faßt 45 ccm, der erste Aufsatz 5 ccm, das sich anschließende Kapillarrohr 0,01 ccm. Die sich unterhalb des Rezipienten abzweigenden beiden Parallelröhren sind (um Fehler durch Kapillardepression zu vermeiden) verschieden weit, die eine so weit wie der Aufsatz, die andere wie die Kapillare (Preis 60 Mk.).

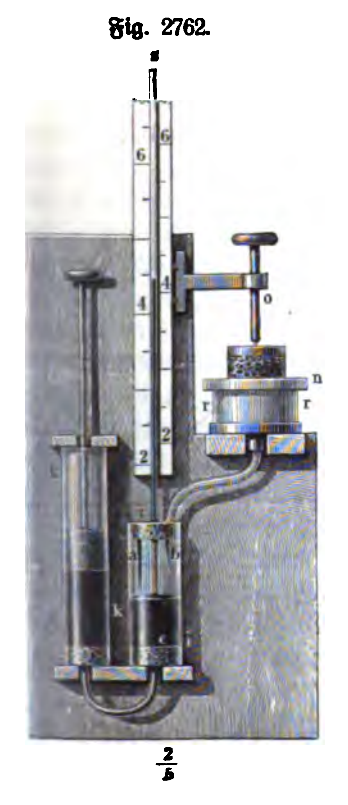
289. Verdünnungsgrenze der Luftpumpe. Ist der Inhalt des Luftpumpenrezipienten $= V$, der des Stiefels $= v$, so sinkt der Druck nach einem Kolbenzug auf $\frac{V}{V+v} = \frac{1}{x}$ Atmosphären, nach n Kolbenzügen auf $\left(\frac{1}{x}\right)^n$. Beispielsweise wäre hiernach, wenn $V = 11\,000$ ccm, $v = 243$ cm, nach 30 Kolbenzügen der Druck $\left(\frac{11\,000}{11\,243}\right)^{30} \cdot 760 = 394{,}6$ mm, was sich leicht an der Barometerprobe konstatieren läßt.

Fig. 2761.



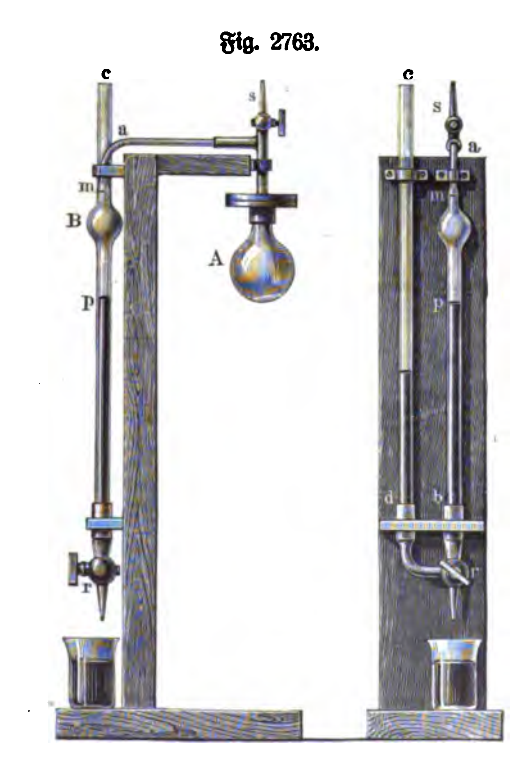
290. Das Volumenometer. Die Bestimmung des spezifischen Gewichtes von pulverigen Substanzen oder solchen, die in den meisten Flüssigkeiten löslich sind, nach dem archimedischen Prinzip ist mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Man hat deshalb nach einem Vorschlage von Say (1799) hierfür Instrumente benutzt, bei denen das Volumen des Körpers dadurch ermittelt wird, daß man bestimmt, wie viel Luft derselbe verdrängt. Die hierzu dienlichen Instrumente, Volumenometer, haben im Laufe der Zeit verschiedene Formen angenommen. Die bekanntesten darunter sind die von Say (Fig. 2761 Lb, 5), Kopp (1840) (Fig. 2762 Lb, 50), Regnault (1845) (Fig. 2763 Lb, 66), Rüdorff (1879) und Paal-

Fig. 2762.



$\frac{2}{5}$

Fig. 2763.



zow[1]) (1881) (Fig. 2764 Lb, 76). Das lufterfüllte Gefäß, in welches der Körper eingebracht wird, wird durch einen Glasdeckel mit Hahn abgeschlossen. Die Veränderung des Luftvolumens wird durch Heben und Senken des offenen Schenkels des Manometers bewirkt, der durch einen Kautschukschlauch mit dem anderen in Verbindung steht (analog wie beim vorigen Apparat). Man ist jederzeit im stande, sich von dem luftdichten Schluß des Deckels zu überzeugen, auch kann durch den Hahn der Apparat leicht mit trockener Luft gefüllt werden[2]).

Fig. 2764.

Ich benutze zur Demonstration einen Luftpumpenrezipienten von 1700 ccm Inhalt, welcher durch enge Röhren mit einer Geißlerschen Quecksilberpumpe, deren Gefäß 920 ccm Rauminhalt hat, verbunden wird. Bezeichnet man die beiden Rauminhalte bezw. mit V und v, den des Körpers (Becherglas mit Kochsalz oder Kristallzucker, welches den Rezipienten etwa zur Hälfte ausfüllt) mit x, die Druckverminderung beim Senken des Quecksilbergefäßes, bis sich das Gasvolumen V auf $V + v$ ausgedehnt hat, mit h (= 27 cm Hg), diejenige bei Ausdehnung des Gasvolums $V - x$ auf $V - x + v$ mit f (= 34 cm Hg) und mit p den Atmosphärendruck (= 76 cm Hg), so bestehen die Gleichungen $V . p = (V + v) . (p - h)$ oder $1700 . 76 = 2620 . 49$, $(V - x) . p = (V - x + v) . (p - f)$ oder $(1700 - x) . 76 = (2620 - x) . 42$, woraus sich das gesuchte Volum $x = 830$ ccm ergibt.

Fig. 2765.

Rebenstorff (Z. 16, 349, 1903) benutzt zur Bestimmung des Rauminhaltes von Gefäßen die in Figur 2765 dargestellte einfache Anordnung. Die Kochflasche, welche ausgemessen werden soll, wird durch einen Schlauch mit einer mit Wasser gefüllten Bürette verbunden, der Quetschhahn der Bürette geöffnet und die Senkung a der Wassersäule, sowie deren Höhe h bestimmt. Auch eine Pipette kann statt der Bürette gebraucht werden, auch kann man natürlich statt Luftverdünnung Verdichtung anwenden, indem man die Bürette unten durch einen längeren Schlauch mit einem Wassergefäße verbindet, welches sich heben läßt. Die Bildung von Wasserdampf bedingt Fehler von etwa 4 Proz.

---

[1]) Es ist zu beziehen von Langhoff, Berlin SW., Kürassierstr. 5. — [2]) Näheres siehe Wied. Ann. 13, 333, 1881.

296. Reduktion des Gewichtes auf das Vakuum. Sind V, M und s **Volumen, Gewicht und spezifisches Gewicht** des gewogenen Körpers, v, m, ς **dieselben Größen für die Gewichtstücke**, so ist der Auftrieb des ersteren, wenn λ das spezifische Gewicht der Luft bezeichnet: $\lambda \,.\, V = \lambda \,.\, M/s$, der der Gewichtstücke $\lambda . v = \lambda . m/\varsigma$. Da nun $M - \lambda . M/s = m - \lambda . m/\varsigma$, so folgt $M = m\left(1 + \frac{\lambda}{s} - \frac{\lambda}{\varsigma}\right)$, d. h. es ist zu dem gefundenen scheinbaren Gewicht m die Korrektion $m\lambda\ (1/s - 1/\varsigma)$ zu addieren, speziell bei Anwendung von Messinggewichten $m . 1{,}20\ (1/s - 1/8{,}4)$ oder für $s =$

0,7	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0
m.1,57	m.1,06	m.0,46	m.0,157	m.0,007	m.0,068.

297. Pneumatische Wanne und Meßzylinder. Das in einem Meßzylinder über der pneumatischen Wanne gemessene Volumen eines Gases ist bei gleicher Gas-

Fig. 2767. Fig. 2768.

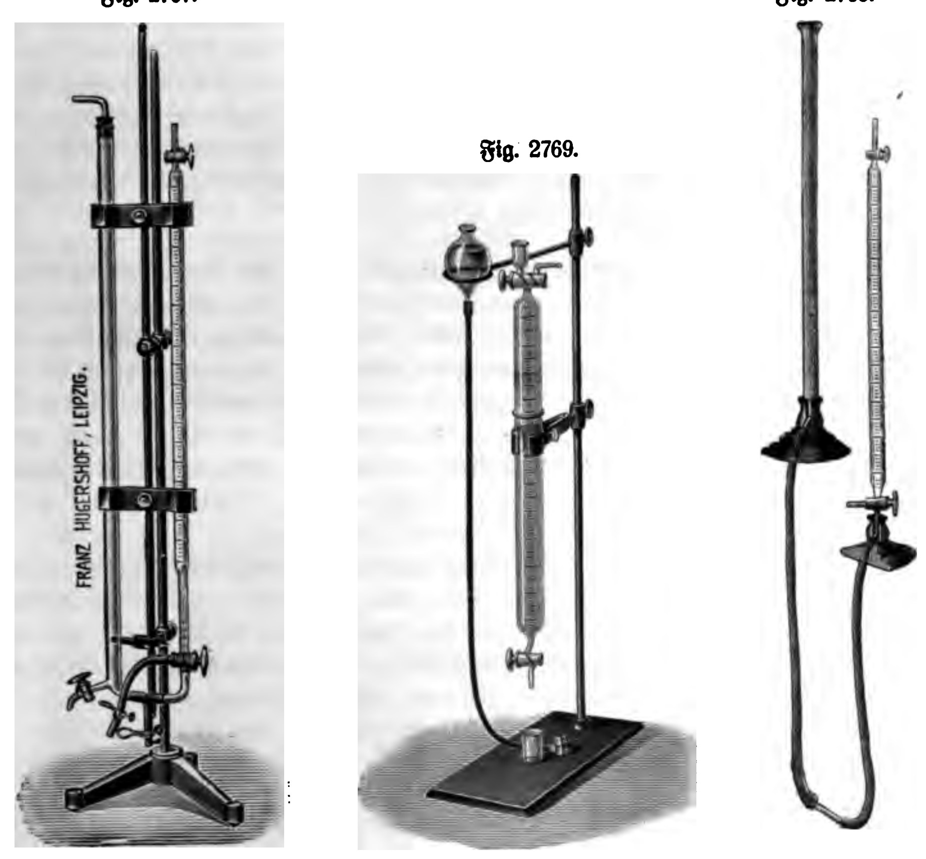


Fig. 2769.

menge um so größer, je höher die darunter stehende Flüssigkeitssäule, welche dem Atmosphärendruck entgegenwirkt. Gewöhnlich reduziert man deshalb das gemessene Volumen auf einen Druck von 760 mm [1]).

[1]) Hier könnte auch die Gasmessung mittels des Glockengasometers besprochen werden, sowie die Expansion des Gases beim Aufstieg eines Luftballons.

Hier wäre auch die nach dem Prinzip der Quecksilberluftpumpe eingerichtete Gasbürette zu erwähnen, welche zu chemischen Versuchen, insbesondere zur Gasanalyse, mannigfache Verwendung findet. (Vgl. die Lehrbücher von Cl. Winkler und W. Hempel[1]).

298. Jamins Kette. Füllt man in eine U-förmige Glasröhre, deren einer Schenkel aus einer Kapillarröhre besteht, Wasser in der Art, daß sich in dem kapillaren Schenkel eine Kette von Luftblasen befindet, so steht im weiteren Schenkel im Falle des Gleichgewichtes das Wasser erheblich höher, als im engeren. Die Erscheinung ist von Bedeutung für das Aufsteigen der Säfte in Pflanzen, für den Blutkreislauf u. s. w.

299. Apparat zur Demonstration der Stockungen in Wasserleitungsröhren. Auf einem Grundbrette ist, ähnlich wie bei Fig. 2393, S. 818, eine wellenförmig gebogene Glasröhre befestigt, die links in ein langes Trichterrohr endigt. Die oberen Bögen der einzelnen Wellen sind tubuliert und die Tubuli durch dichthaltende Stöpsel (eventuell Hähne) verschließbar. Die unteren Bögen werden durch diese Tubuli mit gefärbtem Wasser gefüllt, welches zunächst allenthalben gleich hoch steht, bis zur Mittellinie der Wellenlinie. Gießt man nun durch das Trichterrohr Wasser ein, so kann dieses nicht durch die Röhre durchfließen, da die Drucke in den einzelnen Windungen sich summieren und der Wassersäule im Trichterrohre das Gleichgewicht halten. (W, 10.)

Dasselbe Prinzip kann benutzt werden zur Konstruktion eines niedrigen Quecksilbermanometers für hohe Drucke.

300. Diffusion, physikalische Verbindung (Mischung) der Gase. Wird bei dem Apparate Fig. 2750, S. 996, die eine Kugel nicht evakuiert, sondern mit einem beliebigen Gase unter Atmosphärendruck gefüllt, so findet nichtsdestoweniger eine Expansion der Luft in diesem gaserfüllten Raume statt, ganz ebenso, nur bedeutend langsamer, wie wenn derselbe leer wäre. Der sogenannte Partialdruck derselben vermindert sich auf die Hälfte. Gleiches gilt für das andere Gas, so daß der Gesamtdruck nach der Mischung, d. h. die Summe der Partialdrucke, gleich ist dem anfänglichen Drucke

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \cdots$$

(Gesetz von Dalton).

Diese Mischung der Gase weist ebenso wie die Diffusion bei Flüssigkeiten auf einen Bewegungszustand der Moleküle hin. Bei den Flüssigkeiten war allerdings unsicher, ob nicht durch Kapillarkräfte die eine Flüssigkeit in die Poren der anderen hineingezogen werde. Hier ist dies sicher nicht der Fall, da die Gase keine Kohäsion besitzen, somit derartige Kapillarwirkungen nicht ausüben können.

Das Ohmsche Gesetz der Diffusion ist natürlich auch hier gültig.

Ist z. B. p der Partialdruck des schwereren Gases in der Höhe z über dem Boden eines vertikalen Cylinders zur Zeit t, so ist $\frac{dp}{dt} = K \cdot \frac{d^2p}{dz^2}$, worin der Diffusionskoeffizient K in qcm pro sec beträgt: für CO_2 — Luft = 0,14; O_2 — H_2 = 0,72; O_2 — N_2 = 0,17; SO_2 — H = 0,48; CO_2 — H_2 = 0,55.

[1]) Franz Hugershoff Leipzig, Carolinenstr. 13, liefert eine Bürette nach Winkler, Fig. 2767, zu 32 Mk., eine solche nach Winkler-Hempel, Fig. 2768, zu 14 Mk.; eine Gasbürette nach Bunte mit kleinen Änderungen nach Rischbieth (Z. 15, 75, 1902), Fig. 2769, liefert Franz Müller in Bonn.

Noch bequemer läßt sich der Versuch auf die in Fig. 2770 abgebildete Weise zeigen, wo die Gefäße mit Hähnen versehen sind und aufeinander geschraubt werden können. (E, 20.)


Fig. 2770.

Einfacher nimmt man zwei Glasgefäße (größere Pulverflaschen) mit gleichen Öffnungen, bestreicht die Öffnungen mit Wachs, gießt in die eine Flasche einige Tropfen Brom, welche darin Bromdampf erzeugen, und setzt nun die andere Flasche mit der Mündung nach unten auf und verstreicht das Wachs zur Herstellung luftdichten Verschlusses. Nach einiger Zeit erfüllt sich auch die obere Flasche mit braunem Gase.

Ein anderer Versuch ist folgender: Man gießt Kohlensäure aus einem damit gefüllten Cylinder in einen größeren mit atmosphärischer Luft. Ein Draht wird umgebogen und auf das kurze Ende ein Stückchen Wachskerze gesteckt. Wird das angezündete Licht in den weiteren Cylinder gesteckt, so findet man an dessen Erlöschen, daß auf dem Boden des Cylinders eine Schicht kohlensaures Gas sich befindet; wiederholt man den Versuch nach einiger Zeit, so findet man weniger Kohlensäure, und bald brennt das Licht fort. Man muß aber bei dem Umgießen der Kohlensäure die beiden Cylinder gegeneinander neigen und langsam ausgießen, weil sich die Kohlensäure sonst sogleich so weit mit atmosphärischer Luft mengt, daß das Licht fortbrennen kann.

Röntgen (Wied. Ann. **40**, 110, 1890) setzt ein großes Becherglas auf eine entsprechend große Senkwage und füllt dasselbe durch Eingießen von Kohlensäure. In dem Maße, als die letztere durch Diffusion entweicht, hebt sich die Wage. (Diffusionswage.)

301. Verschiedenheit der Diffusionsgeschwindigkeit. Die Diffusion von Brom in Wasserstoff und Luft und die verschieden große Diffusionsgeschwindigkeit in diesen Gasen kann demonstriert werden, indem man in hohe enge Standcylinder mit Brom gefüllte Glaskugeln einbringt, welche nach Einfüllen des Gases zertrümmert werden.

Fig. 2771.

Rebenstorff (Z. **15**, 26, 1902) benutzt zu diesem Versuche einen 25 cm hohen Standcylinder, in welchen mittels einer Glasrohrpipette einige Tropfen Brom eingebracht werden und sodann ein mit Wasserstoff gefülltes, mit der Öffnung nach unten gekehrtes Reagenzglas (Fig. 2771). Schon nach kurzer Zeit bemerkt man die Färbung des Bromdampfes im obersten Teil des mit Wasserstoff erfüllten Gläschens, während der Luftraum kaum zur Hälfte gelblich erscheint.

302. Diffusion der Gase durch poröse Platten. Kittet man auf den einen Schenkel einer heberförmig gebogenen, zum Teil mit Wasser gefüllten Glasröhre einen kleinen porösen Toncylinder, wie sie für galvanische Versuche gebraucht werden, die Höhlung nach unten gerichtet, und läßt einen Wasserstoffstrom auf denselben wirken, so senkt sich das Wasser sogleich in diesem Schenkel. Das Umgekehrte findet statt, wenn man einen Strom von Kohlensäure auf den Toncylinder wirken läßt. Hierzu eignet sich auch die Anordnung Fig. 2772. (Endosmose, Exosmose). Die Trennung gemischter Gase nach diesem Prinzip wird als Atmolyse bezeichnet.

Wenn der eine Schenkel der heberförmigen Röhre in einen Trichter endet, der mit einer Tonplatte verschlossen ist, so ist der Apparat viel empfindlicher.

Noch weit auffallender läßt sich der Versuch in der in Fig. 2773 dargestellten Weise ausführen. In eine größere dichte Tonzelle (eines galvanischen Elements) wird ein gut schließender Pfropf mit einem langen Glasrohr *c* eingesetzt, letzteres abwärts gerichtet in den Pfropf einer ganz mit Wasser gefüllten doppelt tubulierten Flasche gesteckt, in welche außerdem eine zweite etwas, aber nicht zu eng ausgezogene, bis auf den Boden reichende Glasröhre *b* eingesteckt ist. Stürzt man nun über den

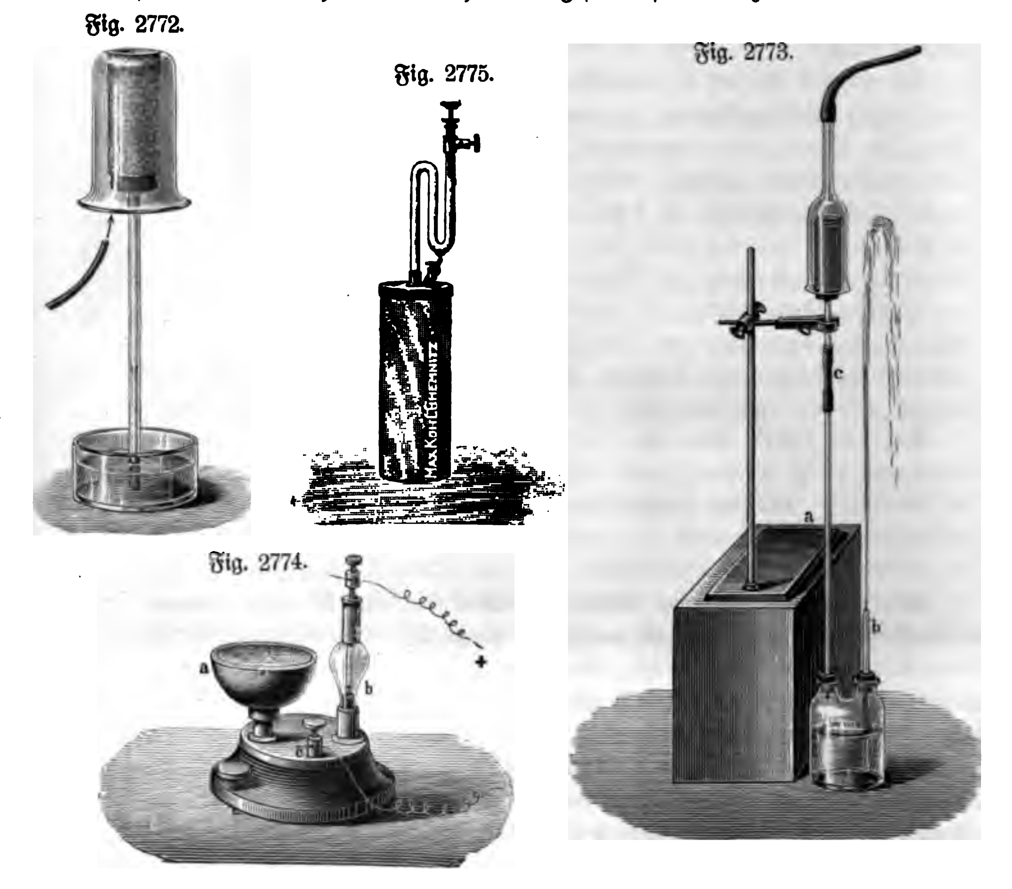


Fig. 2772. Fig. 2775. Fig. 2773. Fig. 2774.

Toncylinder ein weites Becherglas oder dergleichen und läßt in den Zwischenraum zwischen beiden Leuchtgas einströmen, so sieht man sofort einen kräftigen Wasserstrahl aus der Flasche emporschießen.

Benecke gestaltet den Apparat so, daß auch die äußere Glasglocke geschlossen und mit Manometer versehen ist, so daß man den Druck innen und außen ablesen kann. (E, 30.)

Auf das gleiche Prinzip gründen sich Warnapparate für Steinkohlengruben (Fig. 2774) [1]. Es wird bei solchen das Steigen der Flüssigkeit in dem offenen Schenkel des heberartigen Rohres nicht direkt beobachtet, sondern dadurch, daß die Flüssigkeit (Quecksilber) beim Steigen einen elektrischen Stromkreis mit eingeschaltetem

[1]) Zu beziehen vom Mechaniker Albert in Frankfurt a. M. zu 15 Mk.

Läutewerk schließt, so daß also, sobald sich Grubengas der Luft beimengt, die Glocke ertönt. (Fig. 2775 K, 11).

Kolbe demonstriert die Erscheinung bei Leuchtgas (H_2) und Kohlensäure (Äther) mittels des Manometers des Differentialthermoskops.

Glasröhren von 1 bis 3 cm Weite, die man mit einem Gipspfropfen von 3 bis 5 mm Dicke verschließt, sind besonders geeignet, die Diffusion verschiedener in der pneumatischen Wanne darunter geleiteter Gase gegen atmosphärische Luft zu zeigen, indem sich der Wasserstand je nach der Richtung des Gasdurchganges ändert. Der Gipspfropf wird erhalten, wenn man Gipsbrei auf einer ebenen Platte ausbreitet und das Glasrohr hineindrückt und nun, ohne es aufzuheben, längs der Glasplatte abschiebt. Zweckmäßig verstreicht man nachher noch die Fuge zwischen Gipspfropfen und Glas mit dünnem Gipsbrei. Der Pfropf muß übrigens, soll der Versuch gelingen, gut getrocknet sein.

303. Osmotischer Druck. Wäre die Tonzelle bei dem ersten Versuch § 302, S. 1005, nur für das eine Gas durchlässig (halbdurchlässig), so müßte der entstehende osmotische Druck naturgemäß 1 Atm. (Überdruck) betragen. Der wirklich mittels eines Manometers gemessene Druck ist erheblich kleiner.

304. Lösung von Gasen in Flüssigkeiten. Die Oberfläche eines von Gas umgebenen Flüssigkeitstropfens verhält sich im allgemeinen wie eine halbdurchlässige Membran, insofern sie das Gas eindringen läßt, nicht aber die Flüssigkeit hinaus. Auch hier müßte also der Druck im Innern des Tropfens bei der Lösung des Gases um 1 Atm. zunehmen, man bemerkt hiervon aber nichts, da die Wirkung der Oberflächenspannung eine Expansion des Tropfens hindert und der Binnendruck an sich schon sehr hoch ist, so daß die geringe Änderung keine merkliche Änderung der Eigenschaften der Flüssigkeit bedingen kann.

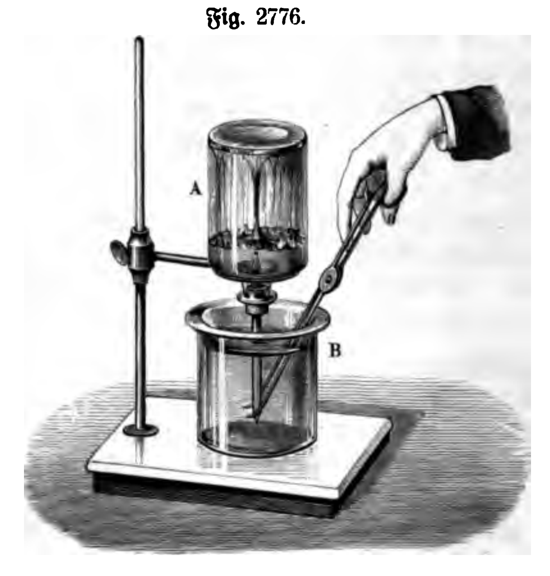
Man kann sich vorstellen, daß die Menge des eindringenden Gases abhängt von der Weite der Poren, also von der chemischen Natur der Flüssigkeit und des Gases, ferner aber vom Drucke und zwar, da das gleiche Volumen bei doppeltem Druck die doppelte Gasmenge aufnimmt, derart, daß sie dem Drucke proportional ist. So gelangt man zu dem Gesetz von Henry und dem Begriff des Absorptionskoeffizienten. Letzterer ist das beim Drucke 1 von der Volumeinheit der Flüssigkeit absorbierte Gasvolum, gemessen beim Druck 1; also technisch beim Druck 1 kg pro qm, absolut beim Druck 1 Dyne pro qcm.

Bei Kohlensäure ist derselbe nahezu = 1, d. h. 1 Liter Wasser nimmt beim Druck 1 kg pro qcm 1 Liter Kohlensäure (gemessen bei diesem Drucke) auf. Ich pflege dies zu zeigen, indem in einen mit Kohlensäure gefüllten großen Glasballon, welcher durch einen langen Schlauch mit einem Glockengasometer in Verbindung steht, durch ein Trichterrohr mit Hahn 1 Liter Wasser eingefüllt wird. Die Glocke des Gasometers steigt dabei um 1 Liter. Schließt man nun den Hahn ab und schüttelt den Ballon, so kehrt die Glocke wieder auf ihren früheren Stand zurück, es ist somit 1 Liter Gas verschwunden.

Zur Demonstration der Verschiedenheit des Absorptionskoeffizienten versieht man zwei gleiche Glaskolben an den Bodenflächen mit angekitteten Griffen aus Metall oder gut lackiertem Holze, füllt den einen derselben in früher angegebener Weise mit Ammoniakgas und taucht nun beide gleichzeitig mittels der Griffe in eine gläserne Wanne voll Wasser. War das Ammoniakgas rein, so wird man be-

obachten, daß das Wasser mit großer Heftigkeit in den dasselbe enthaltenden Kolben hineinstürzt und ihn fast momentan ganz ausfüllt[1]), während der andere Kolben seinen Gasinhalt unverändert behält. Man wiederholt alsdann das Experiment mit Salzsäure und Kohlensäure. Letztere kann man mittels des früher zur Bereitung von Stickoxyd benutzten Apparates aus Kreide und Salzsäure entwickeln. Die Kohlensäure wird ebenfalls, aber langsamer, absorbiert. Man kann die Absorption befördern, wenn man das Gefäß nach einiger Zeit wieder mit dem Finger verschließt und schüttelt; beim Wiederöffnen steigt dann rasch eine größere Menge Wasser hinein.

Fig. 2776.



Rebenstorff (Z. 13, 253, 1900) demonstriert die Löslichkeit von Kohlensäure in Wasser, indem er einen Kartesianischen Taucher mit Kohlensäure füllt. Ein mit Acetylen gefüllter Taucher sinkt viel langsamer als ein mit Kohlensäure gefüllter, obschon Acetylen nahe gleiche Löslichkeit hat. Rasch sinkt ein Taucher mit Kohlensäure in verdünntem Salmiakgeist.

Preßt man nach Fridlander (1892) aus einer Pipette einen Wassertropfen nahezu heraus, so wird derselbe zum Abfallen gebracht, sobald man etwas Äther in die Nähe bringt, da sich hierdurch infolge der Lösung von Äther die Oberflächenspannung vermindert.

Dvořák (Phys. Zeitschr. 2, 223, 1901) füllt ein trichterartiges Gefäß mit sehr enger Spitze mit Wasser, bis dasselbe eben austropft. Nähert man von unten eine kleine Schale mit Äther, so fließt das Wasser alsbald aus, infolge der Verminderung der Oberflächenspannung, bleibt wieder stehen, wenn man die Schale entfernt, fließt von neuem aus, wenn man sie wieder heranbringt u. s. w. Der Versuch läßt sich leicht projizieren.

305. Absorption von Gasen unter Druck. Wird ein Gas in Kontakt mit einer Flüssigkeit, von der es absorbiert werden kann, komprimiert, so wächst die bei gewöhnlichem Drucke gemessene absorbierte Menge proportional dem Drucke.

Nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetze ist das Gasvolumen dem Drucke umgekehrt proportional, man kann deshalb auch sagen, das Volumen des absorbierten Gases ist bei jedem Drucke dasselbe (z. B. absorbiert 1 Liter Wasser bei jedem Drucke 1 Liter der damit in Berührung gebrachten unter Druck gemessenen Kohlensäure). Hiernach ist der Absorptionskoeffizient nicht von dem gewählten Maßsystem abhängig.

---

[1]) Ich benutze dazu einen Kolben von 8 Liter Inhalt. Fig. 2776 (nach Heumann-Kühling) zeigt eine Modifikation des Versuchs, wobei ein zunächst mit Quecksilber gefülltes, unten geschlossenes Glasrohr, welches in den Stopfen eingesetzt ist, unter Wasser abgebrochen wird.

Wird umgekehrt der Druck über einer derart mit Gas gesättigten Flüssigkeit vermindert, so scheidet sich der Überschuß des Gases wieder aus. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Absorption nach Erhöhung des Druckes erfolgt, ist anfänglich sehr groß, nimmt aber rasch ab und ist fast verschwindend, wenn der neue Sättigungspunkt nahezu erreicht ist.

Zu genauen messenden Versuchen dient das Bunsensche Absorptiometer. (Zu beziehen von Dr. Hondek und Hervert in Prag zu 80 bis 100 fl.)

Zur Demonstration könnte man ein dichtschließendes Gefäß, welches mit einem kleinen Federmanometer und Hahn versehen ist, zum Teil mit Wasser und im übrigen mit Kohlensäure anfüllen, bis das Manometer einen bestimmten Druck angibt. Schließt man nun den Hahn und schüttelt, so wird der Zeiger des Manometers zurückgehen, man muß eine neue Quantität einleiten u. s. f., bis schließlich der Sättigungspunkt erreicht ist. Um bei höherem Drucke die Flüssigkeit zu sättigen, müßte man noch mehr Kohlensäure einleiten. Um bei dem Experimente keine Kohlensäure zu verlieren, würde man das Absorptionsgefäß durch einen hinreichend langen Kautschukschlauch, welcher gestattet, das Schütteln ungehindert zu bewerkstelligen, mit dem Kohlensäuregasometer verbinden. Die Absorption wird dann durch das Sinken der Gasometerglocke sichtbar.

Einfacher zeigt man die Ausscheidung der Kohlensäure beim Nachlassen des Druckes bei gewöhnlichem Sodawasser. Man wiegt die gefüllte Flasche ab, bestimmt den Druck in derselben mittels eines Manometers, entleert sie durch einen Schlauch, welcher mit einer kleinen gläsernen Gasometerglocke verbunden ist, die ermöglicht, das Volumen des ausgeschiedenen Gases zu bestimmen, wiegt nochmals und ermittelt die Differenz der beiden Gewichte, welche gleich dem Gewichte des ausgetretenen Wassers ist. Beispielsweise wurden 2,5 Liter Kohlensäure ausgeschieden, als 0,8 Liter Wasser austraten aus einer Flasche, welche mit dem Manometer verbunden 3,14 kg pro qcm Überdruck zeigte. Ist V das gesamte in 0,8 Liter Wasser bei 4,14 kg Druck absorbierte Gas und η der Absorptionskoeffizient, so ist $V = \eta . 0{,}8 . 4{,}14$. Ist v das beim Atmosphärendrucke (1 kg pro qcm) noch in dem Wasser zurückbleibende Gasvolum, so ist $v = \eta . 0{,}8 . 1$, somit $V - v = 2{,}5 = \eta . 0{,}8 . 3{,}14$ und $\eta = \frac{2{,}5}{0{,}8 . 3{,}14} = 1$.

Die Absorptionskoeffizienten (bei 15°) verschiedener Gase bei Lösung in Wasser sind:

$O_2 = 0{,}0342$; $H_2 = 0{,}0186$; $N_2 = 0{,}0148$; $CO_2 = 1{,}0020$; $NH_3 = 727{,}2$.

Bei Lösung in Alkohol ergeben sich dieselben für:

$O_2 = 0{,}28\,397$; $H_2 = 0{,}06\,725$; $N_2 = 0{,}12\,142$; $CO_2 = 3{,}19\,930$; $SO_2 = 144{,}55$.

Als Beispiel der praktischen Verwertung kann man auch den bekannten Liebigschen Krug zur Sodawasserbereitung demonstrieren oder die nach dem Prinzip des Heronsballs eingerichtete Syphonflasche, eventuell eine Maschine zur Bereitung von Sodawasser.

306. Ausscheidungsverzüge. Beim Nachlassen des Druckes erfolgt die Gasausscheidung in der Regel nur an der Oberfläche der Flüssigkeit, oder an den Gefäßwänden oder an eingetauchten fremden Körpern, speziell bei Wasser, wenn diese fettig sind wie z. B. fettige Drähte, Stückchen von Brot, Holz u. s. w., nach der mangel-

haften Adhäsion des Wassers zu schließen, mit dünnen Luftschichten bedeckt sind. Das Gas entweicht dann auch in letztere und bläht sie zu sichtbaren Bläschen auf, von welchen sich in regelmäßigen Pausen kleine Bläschen abschnüren, so daß die Flüssigkeit denselben Anblick gewährt, als ob sie im Sieden begriffen wäre.

Findet die Ausscheidung nicht statt, so entsteht eine übersättigte Gaslösung. Auf der Ausscheidung von Bläschen absorbierter Luft im Blute beruht die Erkrankung von Tauchern bei plötzlichem Austritt aus der Taucherglocke und deren Heilung durch Wiedererhöhung und langsame Erniedrigung des Drucks, wobei keine Bläschen auftreten. (Vielleicht gehört auch die Bergsteigerkrankheit hierher.)

307. Verflüchtigung absorbierter Gase. Wird eine Flüssigkeit, welche Gas absorbiert enthält, das nicht in der atmosphärischen Luft enthalten ist, in einem offenen Gefäße längere Zeit sich selbst überlassen, so verflüchtigt sich allmählich das absorbierte Gas. (Beispiel: Kohlensäurehaltiges Wasser, Nachweis des Kohlensäuregehaltes durch Prüfung mit Kalkwasser.) Setzt man die Schale mit der Flüssigkeit nicht in die freie Luft, sondern unter eine Glasglocke, so findet ebenfalls Verflüchtigung des Gases statt, doch erfüllt sich allmählich die Glasglocke mit dem Gase und schließlich wird ein Gleichgewichtszustand (Sättigungsdruck) erreicht, den man sich dadurch bedingt denken kann, daß in der Zeiteinheit sich ebensoviel Gas verflüchtigt, als wieder absorbiert wird. Durch Vergrößerung der Glocke nähert man sich dem Vorgang in freier Luft. Ebenso wird durch Einblasen von Luft die Verflüchtigung befördert.

308. Gasdiffusion durch Seifenblasen. Nach Fr. C. G. Müller erzeugt man zur Demonstration dieser Erscheinung Seifenblasen mit Hilfe eines dünnen rechtwinkelig gebogenen Glasrohres, welches an seinem einen Ende mit einem Rande versehen ist, um den Blasen eine größere Stützfläche zu bieten. Am anderen Ende ist ein Kautschukschlauch mit Hahn angebracht. Man nimmt etwas (möglichst wenig) Seifenwasser auf, öffnet den Hahn, bläst hinein und schließt ihn wieder, sobald die Blase genügend groß erscheint (etwa 3 cm Durchmesser). Nun schiebt man die an dem Rohre hängende Blase von unten in eine mit Wasserstoff gefüllte innen benetzte Glocke. Nach etwa 30 Sekunden zieht man sie wieder heraus und schleudert sie ab. Sie wird nun wie ein Luftballon bis zur Zimmerdecke steigen. Nähert man der Blase die Flamme eines Bunsenbrenners, so verpufft sie mit großer gelber Flamme. Füllt man die Glocke statt mit Wasserstoff mit Leuchtgas und öffnet nach stattgefundener Diffusion den Hahn des Rohres, so zieht sich die Blase langsam zusammen und stößt aus dem Hahne Leuchtgas aus, welches man anzünden kann.

Taucht man eine Seifenblase einige Zeit in Ätherdampf, d. h. hält man sie in eine tiefe Schale, auf deren Boden sich etwas Schwefeläther befindet, so kann man sie nach dem Herausnehmen mit einem Streichholz anzünden, da durch Diffusion durch die Seifenwasserlamelle das Innere sich mit Ätherdampf gefüllt hat.

309. Das Henry-Daltonsche Gesetz sagt aus, daß von einem Gasgemisch jeder Bestandteil nach Maßgabe seines Partialdruckes absorbiert wird. 1 Liter Wasser absorbiert deshalb bei 15° 0,0342 Liter O_2 $\left(\text{Druck } \frac{21}{100} \text{ Atm.}\right)$, 0,0148 Liter N_2 $\left(\text{Druck } \frac{78}{100}\right)$ und 0,0410 Argon $\left(\text{Druck } \frac{0,94}{100}\right)$. Die relativ beträchtliche Absorption

von O_2 ermöglicht das Leben der Fische. Aus einem Gemisch von Ammoniakgas und Luft wird ersteres fast vollständig durch Absorption entfernt, so daß die Luft nahezu rein zurückbleibt.

310. Chemische Verbindung der Gase. Nicht in allen Fällen bestätigt sich das Daltonsche Gesetz, sondern es entsteht zuweilen bei der Vermischung zweier Gase ein neuer Körper, welcher entweder wieder ein Gas sein kann und mit den beiden Komponenten gemischt bleibt, wobei sich schließlich ein Gleichgewichtszustand herstellt oder ein flüssiger oder fester Körper, welcher in Form von Nebel oder Rauch zur Ausscheidung kommt.

Die in § 300 (S. 1005) beschriebene Vorrichtung kann auch dazu dienen, die chemische Verbindung zweier Gase zu zeigen, namentlich den Unterschied zwischen dieser und der einfachen Mischung (der Analogie halber physikalische Verbindung genannt) klarzustellen, soweit dies ohne Messung der Verbindungsgewichte möglich ist[1]).

Man füllt nämlich erstens die eine Flasche mit Stickoxyd und die andere mit Luft. Beim Verbinden erfüllt sich dann das Ganze mit den rotbraunen Dämpfen der Untersalpetersäure. Füllt man zweitens die eine Flasche mit Salzsäure, die andere mit Ammoniak, so entsteht weißer Rauch von Salmiak.

Die Füllung der einen Flasche mit Stickoxyd im ersten Experiment kann vor dem Unterrichte geschehen.

Im zweiten Falle kann man sich darauf beschränken, in die eine Flasche einige Tropfen Salmiakgeist, in die andere einige Tropfen Salzsäure einzuträufeln. Die daraus von selbst freiwerdenden Gasmengen sind zu dem Versuche völlig ausreichend.

Heumann-Kühling empfiehlt Standcylinder, die mit NH_3 bezw. HCl gefüllt und mit Glasplatten verschlossen sind, aufeinanderzusetzen und dann die Glasplatten rasch wegzuziehen.

Noch instruktiver würde folgender Versuch sein, welcher zugleich erkennen läßt, daß die Gase wirklich völlig verschwinden und an ihrer Stelle einzig und allein der feste Körper erscheint. Zwei gleichgroße Glasröhren sind an einem Ende durch ein Stückchen Kautschukschlauch mit aufgesetztem Quetschhahn verbunden, die anderen Enden stehen mit weiten, Quecksilber enthaltenden Gefäßen in Verbindung. Durch Ansatzröhrchen in der Nähe des verbindenden, zusammengequetschten Kautschukschlauchs läßt man in die eine Glasröhre Ammoniakgas, in die andere Salzsäuregas schon vor dem Unterrichte eintreten und verschließt dann diese Ansatzröhren. Öffnet man nun den Quetschhahn, so vereinigen sich die Gase und das Ganze erfüllt sich rasch mit Quecksilber.

Fig. 2777.

Zur Demonstration der Erscheinungen mittels des Projektionsapparates kann eine Glaszelle wie Fig. 2777 (Lb, 6) dienen.

Die Reaktionsgeschwindigkeit ist oft außerordentlich gering, beispielsweise bei der Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasserdampf bei gewöhnlicher

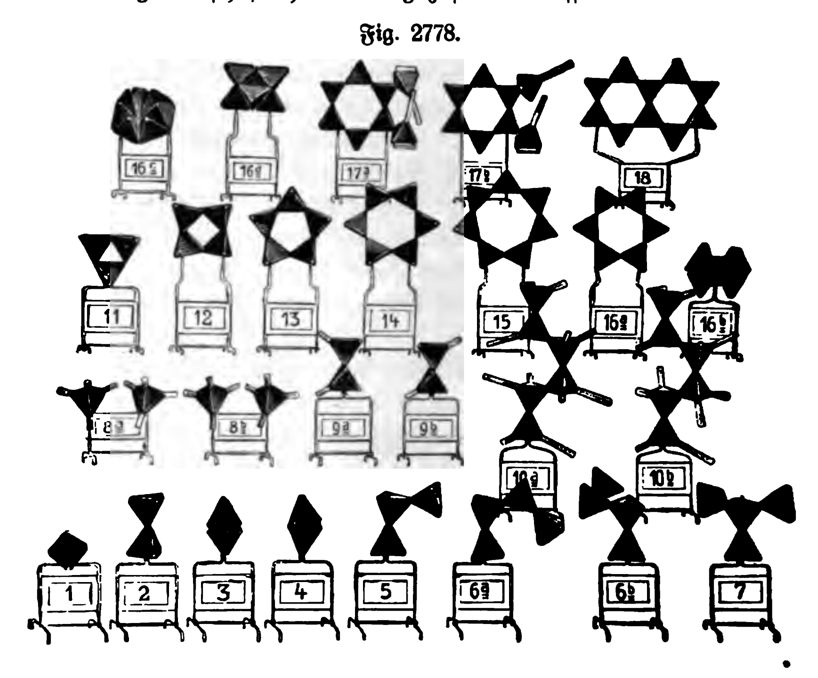
[1]) Fr. Hugershoff, Leipzig, Carolinenstraße 13, liefert Atommodelle nach Kekulé; zur räumlichen Darstellung der atomistischen Konstitution organischer Verbindungen zu 65 Mk., modifiziert nach v. Baeyer zu 40 Mk.; ferner Konfigurationsmodelle nach Wislicenus nach Fig. 2778 zu 50 bis 63 Mk.

Temperatur, sie kann aber durch einen Katalysator außerordentlich stark beeinflußt werden.

Vollkommen trockenes Ammoniak und Salzsäure vereinigen sich nicht zu Salmiak; die Reaktion erfolgt aber mit großer Heftigkeit, sobald eine Spur Wasserdampf hinzutritt.

Brandstätter (Z. 9, 171, 1896) benutzt zur Bildung von Salmiaknebeln zwei Gaswaschflaschen, welche mit konzentrierter Salzsäure, bzw. konzentriertem Salmiakgeist, beschickt werden, leitet Luft hindurch und läßt die austretenden Luftströme in einer gemeinschaftlichen Leitung zusammentreffen.

Fig. 2778.



311. Chemische Bindung von Gasen durch Flüssigkeiten. Man entwickelt in einem mit Knierohr und Sicherheitsröhre versehenen Kolben unter schwachem Erwärmen Dämpfe von Untersalpetersäure aus einem Brei von mit Salpetersäure angerührter Stärke und leitet das Gas in einen zweiten, fast ganz mit Wasser gefüllten Kolben derart, daß es durch eine fast bis zum Boden reichende Röhre eintritt. Man sieht die Farbe des Gases verschwinden und es bleibt ein farbloses Gas (Stickoxyd) übrig, welches aber, sowie es durch die zweite in dem Stopfen des Kolbens angebrachte Röhre entweicht, wieder braune Farbe annimmt, da, wie schon früher gezeigt wurde, Stickoxyd mit dem Sauerstoff der Luft sofort wieder Untersalpetersäure bildet. Daß ein Teil des Gases als chemische Verbindung in dem Wasser zurückgeblieben ist, erkennt man leicht, wenn man einige Tropfen Indigolösung einfließen läßt, welche sofort entfärbt wird.

Um den Unterschied zwischen solcher chemischer Bindung und einfacher Absorption noch auffallender zu machen, entwickelt man in einem zweiten genau gleichgebauten Apparate Bromdämpfe (aus Bromkalium, Braunstein und Schwefelsäure) und leitet diese in gleicher Weise durch Wasser. Dieselben werden, sobald die Luft verdrängt ist, vollständig absorbiert, das Wasser färbt sich braun und läßt, mit

Brom gesättigt in eine leere Flasche gegossen, wieder etwas Brom entweichen, wie leicht an der entstehenden bräunlichen Färbung des Luftinhalts der Flasche zu erkennen ist.

Durch länger fortgesetztes Einleiten von Untersalpetersäure in Wasser kann man zeigen, daß auch hier schließlich die chemische Bindung aufhört und physikalische Lösung wie bei Brom eintritt. Ob in letzterem Falle vielleicht auch ein chemischer Vorgang die Lösung begleitet, ist nicht ohne weiteres zu entscheiden.

Rebenstorff (Z. 12, 134, 1899) gibt einen Versuch an, welcher die scheinbare Gewichtszunahme bei Absorption von Kohlensäure durch Kalilauge infolge der Volumenverminderung, d. h. Verminderung des Luftauftriebs, erkennen läßt.

Nach v. Than (1880) kann man die Bildung chemischer Niederschläge benutzen, um die Langsamkeit der Verbreitung der Gase durch Diffusion zu zeigen. Auf den Boden eines langen Glascylinders klebt man einen Streifen von weißem Filtrierpapier, den man zuvor mit Bleizuckerlösung getränkt und so weit ausgepreßt hat, daß er eben noch feucht geblieben ist. Der Papierstreifen darf höchstens bis ein Drittel so lang sein wie der Cylinder. Hierauf stellt man den Cylinder, die Öffnung nach unten gekehrt, auf seinen eingeschliffenen Stöpsel, welcher ein wenig hohl und offen ist, nachdem man in die Höhlung des Stöpsels etwas Schwefelwasserstoffwasser gegossen hat. Erst in etwa einer Viertelstunde beginnt sich der Streifen unten deutlich zu färben.

Die Einrichtung und Benutzung von Gaswaschflaschen wurde bereits oben (S. 574) besprochen.

312. Massenwirkung. E. Fischer demonstriert dieselbe nach Heumann-Kühling, indem er zunächst Kohlensäure durch eine Lösung von Natriumsulfhydrat (NaHS) leitet und sodann durch Bleinitratlösung, wobei sich an der Bildung eines schwarzen Niederschlages erkennen läßt, daß die Kohlensäure Schwefelwasserstoff aus der Verbindung verdrängt. Sodann wird umgekehrt Schwefelwasserstoff durch eine Lösung von Natriumbikarbonat und alsdann durch Barytwasser geleitet, wobei die weiße Fällung in letzterem beweist, daß der Schwefelwasserstoff die Kohlensäure verdrängt.

313. Dissoziation von Flüssigkeiten. Chlorschwefel zersetzt sich im Vakuum eines Barometers unter Abgabe von Chlor, bis der Druck die Dissoziationstension erreicht hat. Lösung von doppeltkohlensaurem Kalk gibt beim Durchleiten von Luft an diese Kohlensäure ab.

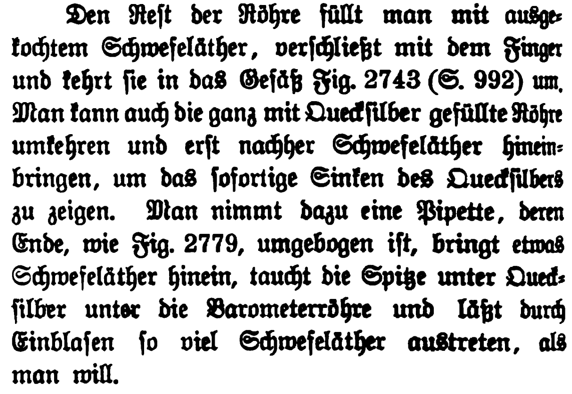
Die Dissoziation der von Ogier entdeckten Verbindung von Phosphorwasserstoff und Salzsäure, des Hydrats der Kohlensäure von v. Wroblewski und des Cailletetschen Hydrats des Phosphorwasserstoffs kann man im Cailletetschen Apparate demonstrieren, indem man, z. B. im ersten Falle, gleiche Volumina von Phosphorwasserstoff und Salzsäuregas in die Röhre (statt Kohlensäure) einbringt. Besser eignet sich der von v. Wroblewski gebrauchte Apparat mit abwärts gerichteter Kapillare (Wied. Ann. 3, 103, 1882).

Alle diese Versuche sind leider umständlich und zeitraubend, bequemere aber nicht bekannt.

413. Dampfbildung. Dampfbildung und Dissoziation sind durchaus analog. Man kann deshalb erstere so auffassen, daß das flüssige Wasser gasförmiges

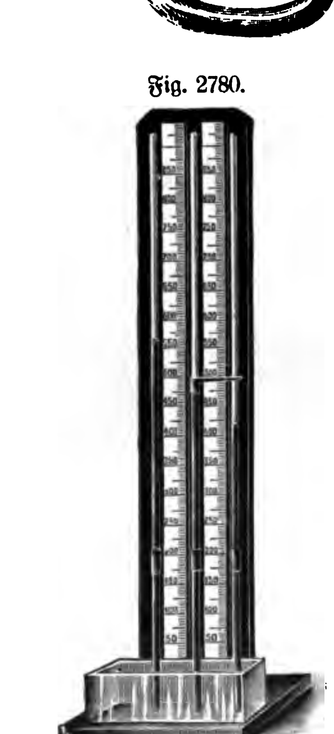
Wasser (Dampf) physikalisch gelöst enthält und daß in gleichem Maße, wie der gelöste Dampf entweicht, durch Zerfallen von Wassermolekülen sich neue Dampfmoleküle bilden, welche dann abermals entweichen u. s. w.[1]). Die Dampftension entspricht vollständig der Dissoziationstension; zur Bestimmung derselben benutzt man ein Barometer, wie es zur Ausführung des Torricellischen Versuchs gebraucht wurde, d. h. eine etwas weite, etwa 1 m oder darüber lange Glasröhre, welche gut gereinigt und einerseits zugeschmolzen wird; diese Röhre füllt man, nachdem sie erwärmt wurde, durch einen Papiertrichter mit reinem, ausgekochtem, noch warmem Quecksilber bis auf etwa ½ bis 1 cm.

Fig. 2779.



Den Rest der Röhre füllt man mit ausgekochtem Schwefeläther, verschließt mit dem Finger und kehrt sie in das Gefäß Fig. 2743 (S. 992) um. Man kann auch die ganz mit Quecksilber gefüllte Röhre umkehren und erst nachher Schwefeläther hineinbringen, um das sofortige Sinken des Quecksilbers zu zeigen. Man nimmt dazu eine Pipette, deren Ende, wie Fig. 2779, umgebogen ist, bringt etwas Schwefeläther hinein, taucht die Spitze unter Quecksilber unter die Barometerröhre und läßt durch Einblasen so viel Schwefeläther austreten, als man will.

Fig. 2780.



Die Größe der Dampftension ergibt sich durch Vergleich der Quecksilberhöhe mit dem Barometerstand, deren Unabhängigkeit vom Volumen, indem man die Röhre neigt oder in ein tiefes Quecksilbergefäß wie Fig. 2530 (S. 893) einsenkt.

Bequem sind Röhren, welche einerseits durch eine eiserne Schraube (Fig. 2744, S. 993) oder einen Glasstöpsel verschlossen werden; man steckt sie zuerst offen ganz in das Gefäß, Fig. 2743, verschließt und zieht sie so weit als möglich heraus, senkt sie wieder ein, öffnet und füllt den übrigen Raum mit ausgekochtem Schwefeläther übervoll, worauf man verschließt und zum Versuche schreitet.

Um die Verschiedenheit der Dampftension verschiedener Flüssigkeiten zu zeigen, stellt man drei gefüllte Barometerröhren nebeneinander in dasselbe Gefäß (Fig. 2780 Lb, 27), bringt in die eine etwas Wasser, in die zweite etwas Alkohol, in die dritte Schwefel-

[1]) Von Clausius wurde im Jahre 1858 eine andere Ansicht aufgestellt, welcher zufolge Dampf- und Flüssigkeitsmoleküle gleichartig sind und somit die Verdampfung einfach ein Abschleudern von Flüssigkeitsmolekülen wäre. Diese ist auch heute noch die verbreitetste, weil sie einfacher ist. Wenn ich der komplizierten Annahme (welche ich im Jahre 1876 aufgestellt habe) den Vorzug gebe, so geschieht es, weil mir die andere unzureichend scheint, eine Reihe von Tatsachen zu erklären, wie in meinem Buche „Molekularphysik", Leipzig 1889, W. Engelmann, und in „Flüssige Kristalle" 1904 näher dargelegt ist.

äther und vergleicht die Quecksilberhöhen mit derjenigen in einem vierten Barometer, welches nur das Torricellische Vakuum enthält.

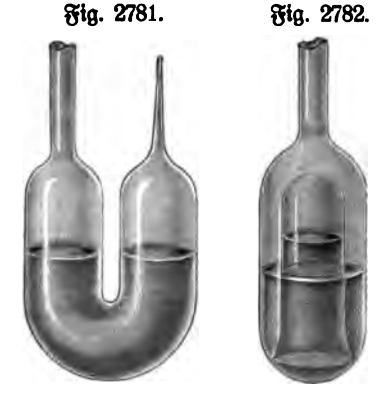
Einen anderen Apparat zu gleichem Zwecke zeigen die Fig. 2781 und Fig. 2782. Bei ersterer ist die zu untersuchende Flüssigkeit in einem kurzen weiten U-förmigen Rohr enthalten, welches einerseits in eine Spitze ausgezogen und dort zugeschmolzen ist, anderseits mit einem Rezipienten in Verbindung steht, in welchem die Luft beliebig verdünnt werden kann, wobei der Druck durch ein ebenfalls angeschlossenes Quecksilber- oder Federmanometer bestimmt wird[1]).

Sobald dieser Druck gleich der Dampftension, steht die Flüssigkeit in beiden Schenkeln gleich hoch, man kann also umgekehrt, sobald letzteres der Fall ist, an dem Manometer ohne weiteres die Dampftension ablesen. Ist der Druck zu klein, so entweichen fortwährend Dampfblasen aus dem geschlossenen durch den offenen Schenkel, im entgegengesetzten Falle schrumpft die Dampfblase zusammen und die Flüssigkeit füllt bald den ganzen geschlossenen Schenkel.

Zur bequemen Regulierung des Druckes benutzt man zweckmäßig zwei Glas- oder Blechbehälter, welche durch Hähne, statt des Rezipienten, mit dem offenen Schenkel verbunden werden und von welchen der eine etwas zu viel, der andere etwas zu wenig verdünnte Luft enthält, so daß durch abwechselndes Öffnen und Schließen der beiden Hähne der Druck in der U-Röhre leicht auf die gewünschte Höhe gebracht werden kann.

Bei diesem Apparate ist nicht notwendig, die Luft vor der Füllung aus dem geschlossenen Schenkel zu entfernen, da sie ganz von selbst mit den Dampfblasen entweicht, wenn man nach der Füllung den Druck einige Zeit auf zu geringer Höhe hält. Vollständig darf man sie nicht entweichen lassen, da sonst, falls einmal zufällig der Druck zu hoch wird und die Dampfblase im geschlossenen Schenkel ganz verschwindet, beim Nachlassen des Druckes überhaupt keine Dampfbildung mehr eintritt, sondern die Flüssigkeit auch dann noch den ganzen geschlossenen Schenkel erfüllt, wenn man im andern ein vollkommenes Vakuum herstellt. Um sich in solchem Falle helfen zu können, ist die Spitze angebracht (Fig. 2781), man kann nämlich das Auftreten einer Dampfblase wieder hervorrufen, wenn man diese durch einen heißen Glasstab, eine kleine Flamme oder einen galvanisch erhitzten Platindrat etwas erwärmt.

Fig. 2781. Fig. 2782.



Bequemer ist in dieser Hinsicht die in Fig. 2782 dargestellte konzentrische Anordnung der Röhren, wobei der geschlossene Schenkel in Form einer kleinen Glocke lose in den offenen hineingestellt ist. Es gelingt hier in der Regel, im Falle des Siedeverzuges die Dampfbildung durch Erschütterung des Apparates wieder auszulösen[2]).

315. Ungesättigte Dämpfe. Mit dem wie oben vorgerichteten Barometer kann man auch das Verhalten ungesättigter Dämpfe und die Abweichung desselben von

[1]) Siehe O. Lehmann, Zeitschr. f. Instr. 2, 77, 1882. Über andere Apparate zur Demonstration der Gas- und Dampfgesetze siehe Z. 14, 348, 1901. — [2]) Über Dampftension bei sehr kleinem Volumen siehe O. Lehmann, Molekularphysik, Leipzig 1888, II, S. 149.

dem der gesättigten sehr gut nachweisen, wenn man nur Sorge getragen hat, nicht so viel Äther in die Röhre zu bringen, daß derselbe den Raum über dem Quecksilber zu sättigen vermag, wenn die Röhre so weit als möglich aus dem Gefäße ausgezogen ist; ist die Röhre nicht über 1 m lang, so reichen 5 mm Äther hin. Man kann dann zeigen, daß der Ätherdampf in dem Falle, wenn er ungesättigt ist, wie ein Gas zusammendrückbar und ausdehnbar ist, und daß seine Expansivkraft ab- und zunimmt, sowie man den Raum größer oder kleiner macht.

Zweckmäßig benutzt man zwei je etwa 2 m lange Barometerröhren von etwa 5 mm Weite, welche man nebeneinander in ein tiefes Gefäß, bestehend aus einer Gasröhre, die unten mit einem eingeschraubten Stopfen, oben mit einer sehr breiten Erweiterungsmuffe versehen ist, eintaucht, oder man benutzt zwei derartige nebeneinander an dem gleichen Stativ befestigte tiefe eiserne Gefäße, wie Fig. 2783 zeigt. Die eine Röhre wird mit soviel Äther beschickt, daß der Dampf stets gesättigt bleibt, wie weit man auch die Röhre aus dem Quecksilber herauszieht, die andere mit so wenig, daß schon beim Ausziehen auf einige Centimeter Höhe der Dampf ungesättigt wird. Zieht man beide Röhren gleichzeitig heraus, so macht sich von dem eben erwähnten Punkte an eine Niveaudifferenz der Quecksilbersäulen geltend, die immer größer wird, je weiter man das Ausziehen fortsetzt.

Fig. 2783.

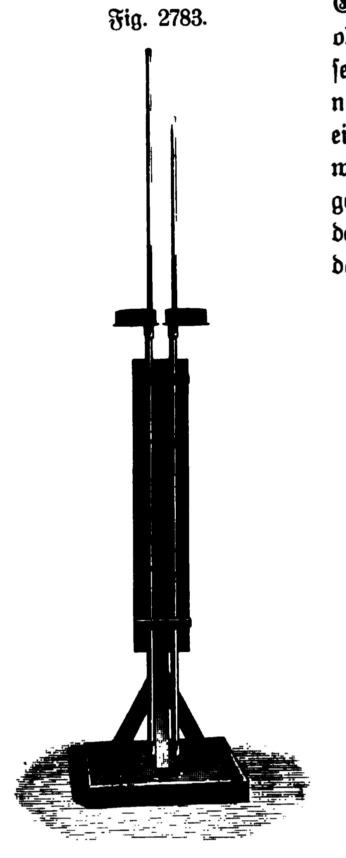


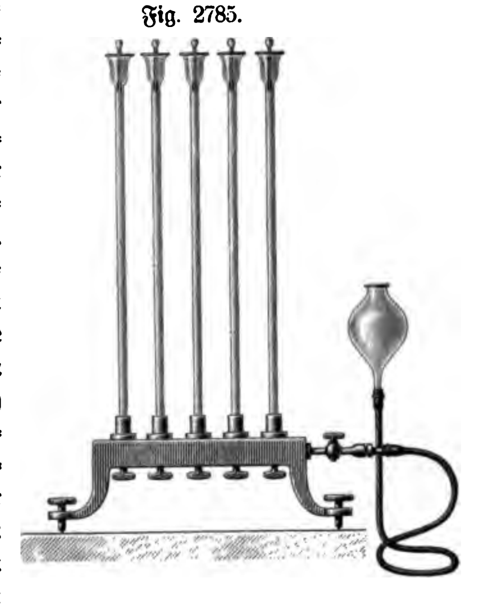
Fig. 2784.

Auch mittels der Luftpumpe und Äther kann man einen ähnlichen Versuch machen. Man nimmt dazu eine etwa 24 cm lange, recht reine, einerseits etwas verengte und zugeschmolzene Röhre und füllt sie heiß mit ausgekochtem, noch heißem Quecksilber durch eine zugespitzte lange Glasröhre bis auf etwa 5 mm; den Rest füllt man mit ausgekochtem Äther auf und kehrt in Quecksilber um. Neben diese Röhre stellt man eine gleich lange Röhre, in die man vor dem Umkehren etwa 3 ccm Luft zugelassen hat. Zieht man nun die Luft langsam aus, so sinkt zuerst das Quecksilber in der Luftröhre, bis die Spannkraft der Ätherdämpfe dem noch übrigen Luftdruck gleich ist, worauf die Dampfbildung beginnt und das Quecksilber in der Luftröhre stehen bleibt; läßt man wieder langsam Luft zu, so findet das Umgekehrte statt. Es muß aber recht langsam gepumpt werden, sonst bleibt das Quecksilber in der Luftröhre nicht stehen. Es ist gut, den Versuch vorher einmal zu machen ehe man ihn zeigt; denn beim Wiederzulassen der Luft zeigt sich oberhalb des Äthers doch gern eine Luftblase; man nimmt dann die Ätherröhre unter Verschluß mit dem Finger heraus und füllt mit ausgekochtem Äther auf. Wenn auch zu viel Äther darin wäre, so darf man nur wieder auspumpen, bis die Ätherröhre kein

Quecksilber mehr enthält und der Äther durch Verdampfung entweicht. Fig. 2784 zeigt den zusammengesetzten Apparat. Auf das Glas *a* ist eine hölzerne Fassung so gepaßt, daß sie durch Reibung hinlänglich festhält; sie trägt ein Brettchen mit einem Querarme, der, sowie die Fassung selbst, zwei Löcher für die Glasröhre hat. Beim Einstellen der Röhren in das Quecksilber muß das Glas ziemlich viel Quecksilber haben, und darum noch in ein weiteres Gefäß gestellt werden; das überflüssige Quecksilber schüttet man wieder aus, ehe man die hölzerne Fassung über die Röhre streift. Noch belehrender wird der Versuch, wenn man zugleich eine ausgekochte Barometerröhre mit unter die Glocke der Luftpumpe bringen kann, allein eine solche müßte mindestens 45 cm hoch sein.

Einen zu gleichem Zwecke dienenden Apparat zeigt Fig. 2785 [1]). Fünf etwa 1,5 m hohe, oben trichterartig erweiterte und mit eingeschliffenem, langgestieltem Glasstöpsel (3 bis 5 mm dick) verschlossene Glasröhren von 5 bis 7 mm innerem Durchmesser sind unten mit eiserner, konisch abgedrehter Fassung versehen, die in einer entsprechenden konischen Vertiefung des gußeisernen Bänkchens mittels Überwurfmutter quecksilberdicht befestigt ist. Alle diese Vertiefungen stehen mit einer horizontalen, einerseits geschlossenen Bohrung in Verbindung, welche anderseits in einen kleinen eisernen Hahn endigt, der durch eine eiserne spiralig gewundene Kapillare oder einen übersponnenen engen Kautschukschlauch entweder mit einem tubulierten Quecksilbergefäß, welches sich wie bei einer Quecksilberluftpumpe heben und senken läßt, oder mit dem Hahn eines anderen eisernen Apparates in Verbindung steht, der dazu dient, Quecksilber in den Kanal und somit in die Glasröhren bis zu gewünschter Höhe einzupressen. Letzterer besteht aus einem unten mit zwei Hähnen versehenen, oben schalenartig erweiterten eisernen Cylinder, in welchen sich ein dicht anschließender Kolben mit Handgriff einschieben läßt. Der zweite Hahn dieses Apparates dient dazu, wenn nötig, einen Teil des Quecksilbers abzulassen. Durch Hähne, welche auf der Unterseite des eisernen Bänkchens angebracht sind, lassen sich die Röhren einzeln außer Verbindung mit dem quecksilberzuführenden Kanal bringen. Die Stöpsel der Trichter müssen auf irgend eine Weise, z. B. durch Knöpfe aus farbigem Glase, welche korrespondierenden Zeichen an den Trichtern entsprechen, derart gekennzeichnet sein, daß eine Verwechslung ausgeschlossen ist. Beim Experimentieren entfernt man zunächst alle Stöpsel und treibt das Quecksilber durch wiederholtes Niederdrücken des Kolbens, der ein nach unten sich öffnendes Ventil enthält, und Schließen des Hahnes beim Aufziehen des Quecksilbers so hoch, daß es

Fig. 2785.



[1]) Zur wirklichen Ausführung dieses Apparates hatte ich nicht Gelegenheit. Er schließt sich an ähnliche zu wissenschaftlichen Untersuchungen bestimmte Apparate an, über die ich in der Zeitschrift für Instrumentenkunde (1882) berichtete. Auch von Weinhold (1881) und Hagen (1882) sind ähnliche Apparate angegeben worden.

alle Röhren bis zu den Trichtern erfüllt. Nun gießt man in den Trichter des ersten Rohres von rechts Schwefeläther, sperrt die übrigen Röhren durch Drehen der hinter dem ersten befindlichen Hähne ab, setzt den Stöpsel ein, gießt noch etwas Quecksilber als Sperrflüssigkeit in den Trichter und läßt dann das Quecksilber durch Öffnen des Hahnes wieder sinken. Alsbald treibt man es wieder empor, entfernt die übrig bleibende Luftblase durch Lüften des Stöpsels, läßt das Quecksilber wieder sinken u. s. f. In die zweite Röhre von rechts bringt man ebenfalls Schwefeläther ein, indes nur eine Spur. Läßt man nun das Quecksilber im ersten und zweiten Rohre gleichzeitig sinken, so sind zunächst die Quecksilberstände gleich, da in beiden gesättigter Dampf enthalten ist. Sie werden verschieden, sobald im zweiten Rohre aller Äther verdampft ist, d. h. der Dampf in den überhitzten (ungesättigten) Zustand übergeht. Sobald diese Grenze erreicht ist, öffnet man den Verbindungshahn der dritten Röhre und lüftet deren Stöpsel, bis so viel Luft eingedrungen ist, daß in dieser Röhre das Quecksilber ebenfalls gleich hoch steht, wie in den beiden anderen. Hierauf gießt man in den Trichter noch Quecksilber ein, um ganz sicher alles weitere Eindringen von Luft zu hindern. Bevor man nun den Verbindungshahn der vierten Röhre öffnet, füllt man deren Trichter etwa bis zu $^3/_4$ seiner Höhe mit Quecksilber und schiebt den Glasstöpsel ein. Beim Öffnen des Hahnes sinkt hier das Quecksilber auf Barometerhöhe. Bei der fünften Röhre wird der Stöpsel ganz entfernt, so daß beim Öffnen des Verbindungshahnes hier das niedrigste Niveau sich herstellt. Zum Abmessen der Quecksilberhöhen bedient man sich eines gewöhnlichen Meterstabes, da bei Demonstrationen nur das Prinzip erläutert werden soll und auf präzise Messungen außerdem aus dem anderen Grunde verzichtet werden muß, weil sich die in den Röhren vorhandene Luft ohne Auskochen nicht genügend entfernen läßt.

Bei Ausführung des Versuches läßt man durch Öffnen des Hahnes Quecksilber abfließen. In Rohr 1 beobachtet man konstante Differenz gegen die Röhren 4 und 5, somit das Gesetz der Unabhängigkeit der Spannung gesättigter Dämpfe vom Volumen. In Rohr 3 behnt sich das Gas dem Mariotteschen Gesetze entsprechend aus und durch Vergleichung mit Rohr 2 folgt weiter, inwieweit das Verhalten ungesättigter Dämpfe von dem der permanenten Gase abweicht.

316. Verflüssigung der Gase. Daß dieselben Gesetze, die man für Äther oder auch für Wasserdampf durch die eben beschriebenen Versuche nachgewiesen hat, auch für andere Gase gelten, zeigt man am besten durch den in Fig. 2786 in etwa $^1/_6$ bis $^1/_5$ der wirklichen Größe abgebildeten Apparat. Derselbe besteht aus einem starken Glascylinder AA mit messingenem Fuße und eben solcher Fassung am oberen Teile; in letztere läßt sich der Aufsatz mit der Druckpumpe und dem Wasserbehälter F schrauben. Der Glascylinder ist zweckmäßig unten nicht geöffnet, sondern noch halbrund. Das Glas muß bei den angegebenen Dimensionen 7 bis 8 mm dick sein. Die zusammengeschraubten Stellen können durch Leder oder Kautschuk gedichtet werden. In den Cylinder stellt man mittels eines Stieles ein Gefäß C aus Eisen, in welchem sich Quecksilber befindet, und in dieses kommen vier Röhrchen, wovon eines am besten nach Atmosphären graduiert ist und atmosphärische Luft enthält, die anderen enthalten schwefligsaures Gas, Ammoniakgas und Cyangas, von deren Darstellung unten das Nähere folgen soll. Das Quecksilbergefäß braucht übrigens nur die Hälfte der in der Zeichnung angegebenen Höhe zu haben, und die Röhrchen

müssen am Stiele auf irgend eine Weise befestigt werden können, weil sie sonst nicht tief genug in das Quecksilber eintauchen. Der Stiel hat zu diesem Zwecke zwei Scheiben, jede mit vier gespaltenen Ringen, die durch eine Schraube festgezogen werden können, der Stiel selbst, welcher diese Scheiben trägt, muß vom Boden des Gefäßes losgeschraubt werden, um die Ringe über die Röhren streifen zu können. Da jedoch auch dann noch die Ringe federnd gemacht und mit einer Schraube versehen werden müssen, wie in Fig. 2787, Nr. 1, so dürfte es zweckmäßiger sein, eine der drei anderen in Fig. 2787 angegebenen Befestigungsweisen anzuwenden, wobei man die Röhren nur an ihren Platz zu stellen hat. Ich würde Nr. 3 den Vorzug geben. Die Röhren müssen jedenfalls so lang genommen werden, daß sie bis beinahe an die obere Fassung reichen, damit die über dem Quecksilber entstehende Flüssigkeitsschicht gehörig sichtbar wird. Ist das Gefäß *C* eingesetzt, so füllt man *AA* mit Wasser, schraubt das Pumpenstück auf, füllt auch *F* mit Wasser, stellt den Hahn *s* so, daß die Pumpe mit dem Behälter *F* kommuniziert, was die Striche auf seinem Griffe zeigen, zieht die Pumpe auf, um sie mit Wasser zu füllen, dreht den Hahn eine Viertelwendung, um die Kommunikation der Pumpe mit *F* abzuschließen und jene mit *A* herzustellen, worauf man den Kolben niederdrückt. Nachdem man auf diese Weise einige Kolbenzüge getan, so stellt man langsam den Hahn so, daß *A* und *F* kommunizieren, um die beim Füllen in *A* zurückgebliebene Luft zu entlassen. Letzteres wiederholt man noch einmal oder überhaupt so oft, bis man keine Luft mehr entweichen sieht. Jetzt wird die Kompression von neuem gemacht, wobei das in dem mit Luft gefüllten Röhrchen steigende Quecksilber den jederzeit stattfindenden Druck angibt; die anderen Gase werden nacheinander tropfbar flüssig, und sowie eines derselben anfängt, tropfbar flüssig zu werden, steigt bei weiterem Pumpen das Quecksilber beinahe nur noch in diesem Röhrchen, bis das Gas ganz in eine tropfbare Flüssigkeit verwandelt ist. Öffnet man den Hahn *s* ein wenig gegen *F*, so entweicht das Wasser nach und nach, und sowie der Druck soweit nachgelassen hat, daß eines der Gase bei der gegebenen

Fig. 2786.



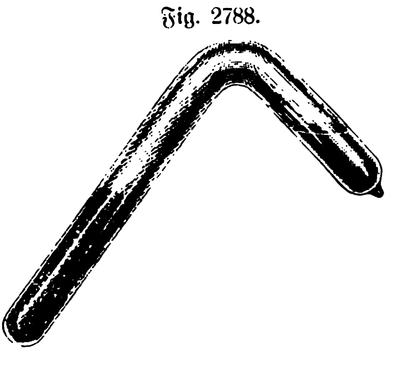
Fig. 2787.

Temperatur elastisch flüssig existieren kann, verwandelt es sich sehr rasch, so rasch als das Wasser entweicht, ganz in Gas. Beim Öffnen des Apparates behufs der Entleerung muß die Verbindung mit dem Wassergefäße *F* und dem Cylinder *A* offen sein, weil sonst beim Herausschrauben in *A* eine Verdünnung entsteht und die Gase zum Teil aus den Röhren entweichen, was für eine Wiederholung störend wäre. Bleibt der Hahn zwischen *F* und *A* offen, so füllt sich der von der Schraube eingenommene Raum mit Wasser, welches beim Öffnen überläuft; es ist daher zweckmäßig, vor dem Öffnen des Apparates das Wasser aus *F* durch einen Heber zu entleeren [1]). Entleert aber muß der Apparat jedesmal werden, teils weil das eine Gas sich zersetzt, teils weil die Gase absorbiert werden [1]). (W, 100.)

Die Darstellung der genannten Gase geschieht in kleinen Retorten von Glas, an welche man eine gewöhnliche Gasentwickelungsröhre anbringt, die in Quecksilber führt. Letzteres befindet sich dabei in einer 5 bis 6 cm weiten Schale, worin es nur etwa 2 cm hoch zu stehen braucht. Man hält die mit Quecksilber übervoll gemachten Röhrchen, wie beim Toricellischen Versuche, mit dem Finger zu und kehrt sie in das Quecksilber um; ebenso bringt man sie in das Gefäß des Kompressionsapparates. Man braucht also nur wenig Quecksilber. Die Gase brauchen nicht besonders getrocknet zu werden, nur muß man dieselben nicht eher auffangen, als bis man sicher sein kann, daß alle atmosphärische Luft aus der Retorte ausgetrieben ist.

Schwefligsaures Gas erhält man durch Erhitzen von 1 Tl. Vitriol (nicht engl. Schwefelsäure) mit 1/5 Kupferspänen, Cyangas durch gelindes Erwärmen von Cyanquecksilber (sehr giftig!). Ammoniakgas durch Erhitzen von 1 Tl. gepulvertem Salmiak mit 2 Tln. zerfallenem gebranntem Kalk. Die Erhitzung kann in jedem Falle mit der gewöhnlichen einfachen Weingeistlampe bewirkt werden, muß aber namentlich beim schwefligsauren Gase langsam geführt werden, da die Masse sonst stark aufschäumt. Andere Gase als die angeführten erfordern zum Flüssigwerden entweder einen zu hohen Druck oder lassen sich, wie das Chlor, nicht gut mit Quecksilber absperren. Wegen der im Quecksilber und an den Wänden der Röhren adhärierenden Luft ist es zweckmäßig, die erstmals mit Gas gefüllten Röhren nochmals mit Quecksilber zu füllen und wieder Gas einzulassen. Allein selbst bei Wiederholung dieses Verfahrens hält es schwer, alle Luft auszuschließen; daher steigt das Quecksilber beim Komprimieren in der die atmosphärische Luft enthaltenden Röhre immer noch ein wenig, wenn auch schon das Gas in einer der anderen tropfbar flüssig wird; daher füllt sich auch eine solche Röhre nie ganz mit Flüssigkeit, sondern enthält immer noch eine kleine Luftblase.

Fig. 2788.



Zur Verdichtung der Kohlensäure brachte Faraday (1823) in den verschlossenen Schenkel einer gebogenen und starken Glasröhre (Fig. 2788) Schwefelsäure und darüber, von Papier gehalten, wasserfreie Soda; der andere Schenkel wurde hierauf zugeschmolzen, in eine Kältemischung gesetzt und durch Schütteln die Soda mit der Schwefelsäure in Berührung gebracht. Die entwickelte Kohlensäure ver-

[1]) Will man den Apparat immer zusammengestellt lassen, so verwendet man besser Glycerin, welches im Winter nicht gefriert. Der Hahn muß offen bleiben.

dichtete sich alsdann in dem abgekühlten Schenkel unter einem Drucke von etwa 30 Atmosphären. Der Versuch läßt sich projizieren, ist aber nicht ungefährlich und erfordert Vorsichtsmaßregeln für den Fall des Zerspringens der Röhre.

317. Kompressionspumpen zur Verflüssigung von Gasen. Zu Vorlesungszwecken dient gewöhnlich die nach Angaben von Cailletet, konstruierte Pumpe, deren bereits oben (§ 131) gedacht wurde [1]). Das zu komprimierende Gas wird in ein oben kapillar ausgezogenes starkes Glasrohr *TT*, Fig. 2790, eingefüllt, welches in den messingenen Stopfen *A* mit Marineleim oder feinem Siegellack eingekittet ist. Unten besitzt es einen hakenförmig nach oben umgebogenen kleinen Fortsatz und ist durch das Quecksilber in dem Gefäße *B* abgesperrt. Das

Fig. 2789.

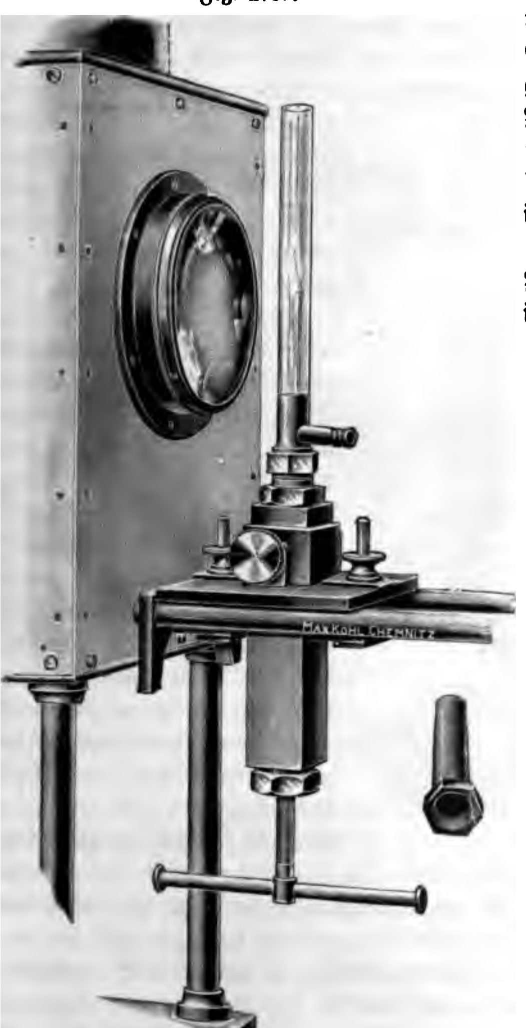
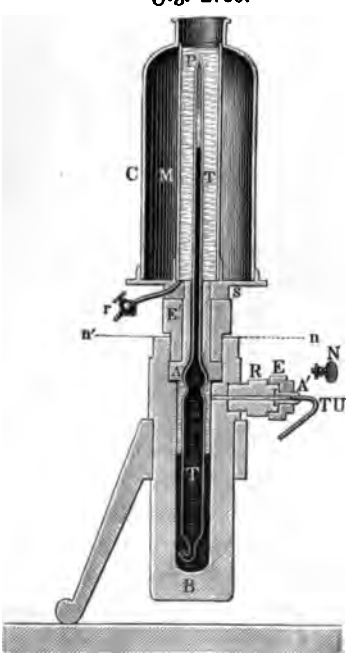


Fig. 2790.



Gefäß *B* ruht auf einem Dreifuß *PP* und ist oben durch einen Stopfen *A* und die Schraubenmutter *E'* dicht abgeschlossen. Über dem Quecksilber befindet sich Glycerin, welches durch die, mittels des Verbindungsstückes *REA'* an dem Behälter angebrachte Kupferkapillare *TU* aus der in Fig. 2792 dargestellten Pumpe zugeleitet und mit starkem Drucke eingepreßt wird.

[1]) Zu beziehen von Ducretet u. Co. (Constructeurs, Paris, Rue Claude-Bernard 75) zu 530 Mk. Einen einfacheren Apparat zu gleichem Zwecke zur Benutzung mit der Projektionslaterne eingerichtet nach Fig. 2789 liefert Max Kohl, Chemnitz, zu 40 Mk.

Um das Gas in das Rohr TT einzufüllen, kann man, wie Fig. 2791 zeigt, den unteren Fortsatz desselben mittels eines Kautschukschlauches H mit dem Gasentwickelungsapparat verbinden und bei geöffneter Spitze P das Gas längere Zeit durchströmen lassen, bis sicher die letzten Reste von Luft verdrängt sind. Alsdann wird P zugeschmolzen und das Rohr vertikal gestellt. Schon zuvor hatte man in dasselbe eine kleine Quantität Quecksilber G gebracht, die sich nun in dem hakenförmigen Fortsatze sammelt und denselben absperrt, so daß man, ohne Eindringen von Luft befürchten zu müssen, den Schlauch H abnehmen und das Rohr in das Gefäß B einsetzen kann. Wollte man die Spitze P nicht öffnen, so hätte man das Rohr durch einen dicken sogenannten Luftpumpenschlauch oder durch Glasröhren mit Siegellackkittung mit einer Quecksilberluftpumpe zu verbinden und wiederholt zu evakuieren und wieder Gas einströmen zu lassen.

Fig. 2791.

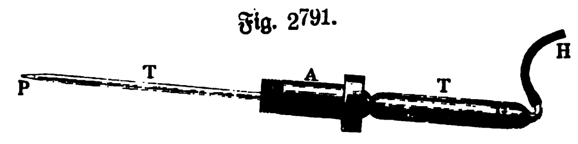
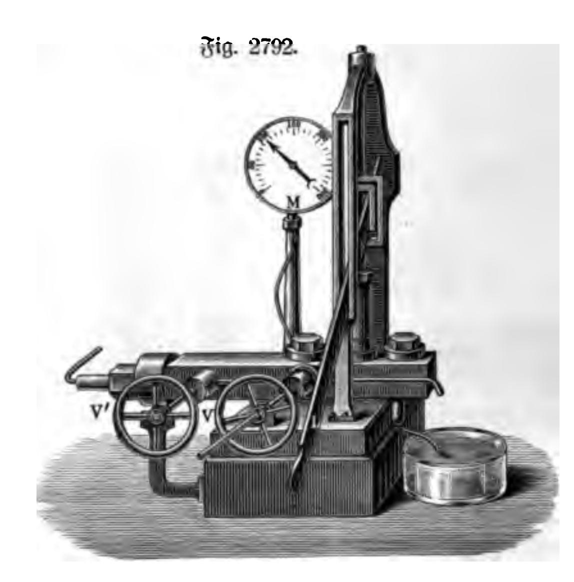


Fig. 2792.



Die Pumpe, Fig. 2792, wird in Tätigkeit gesetzt durch den Hebel L, bis der gewünschte Druck, welcher an dem Manometer M abgelesen wird, erreicht ist. Dann besorgt man die weiteren feineren Druckänderungen durch die Schraube V. V' ist das Ablaßventil, durch dessen Öffnung der Druck wieder beseitigt wird. Das austretende Glycerin fließt dabei in die rechter Hand befindliche, mit staubfreiem, filtriertem Glycerin gefüllte Glasschale, in welche das Saugrohr der Pumpe eintaucht. Man muß dafür sorgen, daß diese Flüssigkeit immer möglichst rein bleibt, da kleine suspendierte Körnchen, Fäserchen u. s. w. sich leicht in den Ventilen festsetzen und dieselben undicht machen können[1]).

Zu messenden Versuchen kann man die zweckmäßig in einer aus Spiegelglasplatten zusammengekitteten, viereckigen, mit Wasser gefüllten Röhre eingesetzte Kapillare nebst einer Teilung auf Glas projizieren und auf dem Schirm das Volumen der entstandenen flüssigen Kohlensäure über dem Quecksilber ausmessen. Ferner kann man zeigen, daß unmittelbar vor der Verflüssigung noch annähernd das Boyle-Mariottesche Gesetz gilt. Beispielsweise war das Volumen des Gases bei 1 Atm. Druck = 61 ccm, bei 49 Atm. 1,24 ccm.

[1]) Kapillarröhren aus Kupfer, Messing u. s. w. sind zu beziehen von M. Cochius, Berlin S., Ritterstraße 113, und G. Goliasch u. Co., Berlin SW., Lindenstraße 23; Stahlrohre von Siecke u. Schultz, Berlin C., Neue Grünstraße 25 b.

318. Versuche über die Mischung von Dämpfen mit Gasen. Um das Daltonsche Gesetz nachzuweisen, daß Dämpfe, welche im Zustande der Sättigung einen Raum erfüllen, auch wenn sie mit anderen Gasen gemengt sind, dieselbe Spannung annehmen wie im leeren Raume, macht man dieselbe Vorbereitung, wie zum Beweise des Mariotteschen Gesetzes für Verdünnung (S. 990) und läßt dann in die Barometerleere mittels des gekrümmten Endes einer Pipette einige Tropfen Schwefeläther aufsteigen. Das Quecksilber sinkt sogleich. Bringt man aber durch

Fig. 2793.



Fig. 2795.



Fig. 2796.



Einsenken der Röhre das Volumen der Luft auf das frühere zurück, so erhält man eine um so viel größere Spannung, als die Spannung des Ätherdampfes im leeren Raume für die gegebene Temperatur beträgt.

Fig. 2794.

Sehr einfach kann man dieses auch auf folgende Weise zeigen. Auf ein Gefäß mit breiter Standfläche, wie Fig. 2793, richtet man einen sehr gut schließenden Pfropf mit zwei Glasröhren, wovon die eine für den Gebrauch als Manometer gebogen ist. Um das Gefäß gehörig zu trocknen, setzt man die eine dieser Röhren mit der Luftpumpe und die andere mit einer Chlorcalciumröhre durch passend gebogene Glasröhren und vulkanisierten Kautschuk in Verbindung und tut mehrmals einige Züge mit der Luftpumpe in Zwischenräumen von etwa $1/4$ Stunde. Ist das Gefäß mit gehörig trockener Luft gefüllt, so nimmt man die Verbindung von der Manometerröhre ab und gießt sogleich etwas Quecksilber ein, am besten durch eine lang ausgezogene Glasröhre; nachher setzt man auf die andere Röhre einen kleinen Trichter, Fig. 2794, mittels eines Kautschukröhrchens, das durch eine Klemme (S. 281 u. 282) zu verschließen ist. Hier herein bringt man Wasser und läßt davon durch Öffnen der Klemme ein paar Tropfen in das Gefäß gelangen. Es dauert namentlich beim Umschütteln nicht lange, bis das Quecksilber im Manometer die Zunahme der Spannkraft (etwa soviel mm als Grade Celsius) zeigt.

Fig. 2795 (Lb, 10) zeigt einen einfachen Apparat, bei welchem das Einbringen der Flüssigkeit durch einen eigentümlich konstruierten Hahn bewirkt wird.

Einfacher bringt man den Äther in eine dünnwandige Glaskugel eingeschmolzen vor dem Versuch in die Flasche und zertrümmert dann die Kugel durch Schütteln der Flasche. (Fig. 2796.)

Kraus (Z. 9, 88, 1896) weist die Druckzunahme nach, indem er an Stelle des Manometers einen Heronsball setzt, aus welchem natürlich ein Strahl hervorgetrieben wird.

Stefan (1873) demonstriert die Erscheinung in sehr einfacher Weise dadurch, daß er ein leeres Reagenzgläschen mit der Öffnung nach unten in Schwefeläther eintaucht. Bald entweicht infolge der Druckzunahme im Innern eine Luftblase nach der anderen. Wird das Gläschen mit Wasserstoff anstatt Luft gefüllt, so entweichen die Blasen weit rascher, infolge der größeren Diffusionsgeschwindigkeit von Ätherdampf in Wasserstoff.

Rebenstorff (Z. 14, 352, 1901) zeigt die Zunahme des Druckes, indem er in einen etwas zu schweren Kartesianischen Taucher einige Tropfen Schwefeläther einbringt. Der Taucher steigt alsbald in die Höhe. Verwendet man nebeneinander zwei Taucher, von welchen der eine mit Wasserstoff gefüllt ist, so steigt letzterer schneller.

Winkelmann (1886) benutzt zu gleichem Zwecke zwei gleiche Barometer, von welchem das eine etwas Luft, das andere etwas Wasserstoff (von gleichem Druck) enthält. Bringt man nun noch Äther hinzu, so fällt das Quecksilber in dem zweiten Rohre weit rascher als in dem ersten, der schließliche Gleichgewichtszustand dagegen ist derselbe.

Fig. 2797.



Ferner empfiehlt Rebenstorff (Z. 17, 91, 1904), das Wasser eines Heronsballs durch Aufgießen von etwas Äther und schnelles Einsetzen des Verschlußes zum Emporspritzen zu bringen. Eine auffälligere Form des Versuches besteht darin, daß der Äther in einem umgebogenen, in der Mitte erweiterten Röhrchen, welches in der Biegung etwas Quecksilber enthält, wie Fig. 2797 andeutet, eingebracht wird und sodann durch eine rasche Bewegung das Quecksilber herausgeschleudert wird, wobei der Äther herausfließt. Der Wasserstrahl erreicht dann leicht die Zimmerdecke, wenn man die Ausflußspitze eine Zeit lang zuhält. Die Flasche muß natürlich hinreichend kräftig sein, um den Druck auszuhalten. Bringt man dagegen auf den Boden eines Reagenzglases einige Tropfen Äther, verschließt das Gläschen mit einem Gummistopfen mit Glasröhrchen und angesetztem Schlauchstück, saugt an letzterem, drückt ihn zu und öffnet ihn wieder unter Wasser, so drängt das Wasser fast bis zum Boden des Gläschens empor.

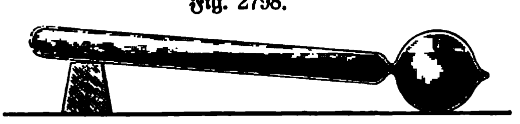
Auch aus dem mittels der aerostatischen Wage bestimmten Auftrieb (S. 980) läßt sich die Dampftension oder, wenn diese bekannt ist, das spezifische Gewicht des Dampfes bestimmen. Ist beispielsweise das Volumen des Senkkörpers = 8 cdm, die Tension des Ätherdampfs = 0,5 Atm., so ist der Auftrieb, wenn x das spezifische Gewicht bezogen auf Luft, $= \left(\frac{x+1}{2} - 1\right) 8 \,.\, 1{,}2$ g. Gefunden wurden 4 g, somit $x = 1{,}85$.

319. Sieden bei Druckerniedrigung. Eine Dampfblase kann nur dann bestehen, wenn der Dampfdruck im Innern gleich dem Drucke der Atmosphäre und dem Drucke der darüberstehenden Wassersäule sowie dem Drucke hervorgebracht durch die Oberflächenspannung.

Lauwarmes Wasser kocht, wenn man den Druck der Luft entfernt. Soll der Versuch schnell und sicher gehen, so wähle man einen kleinen Rezipienten und ein hohes enges Wassergefäß. Ist der Rezipient zu groß, so bewirkt der Kolben nicht bei jedem Zuge eine hinreichende Entfernung der gebildeten Wasserdämpfe, deren eigener Druck das Aufkochen des Wassers hindert, daher dieses überhaupt nur während des Ausziehens stattfindet. Ist das Wassergefäß zu weit, so entsteht so viel Dampf an der Oberfläche des Wassers, als der Kolben entfernt, es kann also wieder kein Aufkochen entstehen. Diesen Versuch kann man mit einer Handluftpumpe anstellen, wenn man auch keinen Teller dazu hat; man braucht nur den nächsten besten Glaskolben durch Glas und Kautschukröhren mit der Luftpumpe in Verbindung zu setzen, nachdem man das Wasser darin gehörig erwärmt hat. An warmen Tagen ist letzteres unnötig.

320. Siedeverzüge. Um dieselben zu zeigen, bedient man sich des Wasserhammers, Fig. 2798, d. h. einer luftleer gemachten Glasröhre, die aus zwei durch eine Einschnürung getrennten Abteilungen besteht, in welcher sich so viel Wasser befindet, daß die eine kugelförmige Abteilung *b* damit völlig gefüllt werden kann. Läßt man durch Senken der Kugel das Wasser in diese einfließen und kehrt dann den Wasserhammer um, so bleibt das Wasser darin hängen. Erst durch einen kräftigen Stoß gegen das Ende *a* kann man das Losreißen bewirken (E, 2). Vgl. auch S. 835.

Fig. 2798.



321. Verdunsten von Flüssigkeiten. Man bringt einen Tropfen Brom auf eine Glasplatte. In wenig Augenblicken ist derselbe verschwunden, er hat sich, wie man an der Entstehung brauner Dämpfe sehen kann, in die gasförmige Modifikation umgewandelt (Projektion). Den gleichen Versuch kann man mit Schwefelkohlenstoff, Schwefeläther, Petroleumäther und dergleichen ausführen, am einfachsten derart, daß man mit diesen Flüssigkeiten einen Bogen Fließpapier benetzt und abwartet bis derselbe trocken ist. Glycerin ist ein Beispiel für das entgegengesetzte Verhalten. Es läßt sich ferner sehr leicht demonstrieren, wie die Verdunstung durch einen Luftstrom befördert, dagegen durch Überdecken einer Glasglocke gehemmt wird.

Sehr interessant gestaltet sich auch der Versuch mit Hilfe des Schlierenapparates (siehe unter Dioptrik). Man taucht einen Glasstab in Wasser und hält ihn in den Strahlenkegel. Das Entweichen der Wasserdämpfe läßt sich dann in schönster Weise auf dem Schirme verfolgen [1]).

322. Kontaktbewegung. Starker Wein in ein Trinkglas geschüttet zeigt die sogenannten Weintränen. Es steigen am Rande der Flüssigkeit Tröpfchen an dem

[1]) Hier wären auch zu erwähnen: Verdunstungsmesser (Atmometer, Evaporometer, Atmidoskop); Verdunstungsgeschwindigkeit (Einfluß des Sättigungsgrades; der Luftbewegung); Wäschetrocknen u. s. w.

Glase in die Höhe. Das analoge Verhalten zeigt eine Lösung eines Anilinfarbstoffes in Weingeist, wenn ein Tropfen derselben auf eine reine Glasplatte gegeben wird. Das Fortschreiten der Tröpfchen rührt davon her, daß die verdunstende Flüssigkeit am Rande wasserreicher wird und daher dort größere Oberflächenspannung erhält. In der Mitte steigt nun aber alkoholreiche Flüssigkeit, d. h. solche mit geringer Oberflächenspannung, auf, es entsteht infolgedessen eine zentrifugale Kontakt-

Fig. 2799.



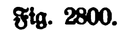
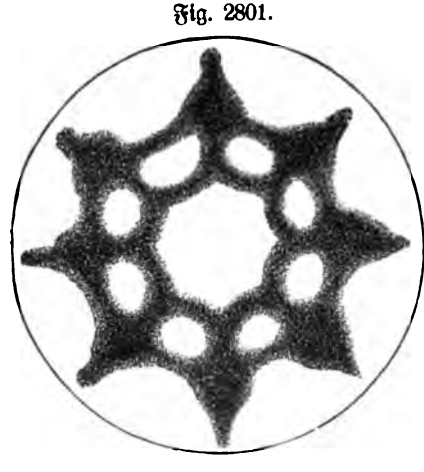


Fig. 2800.



Fig. 2801.



bewegung der Flüssigkeit an der Oberfläche, welche schließlich bei völliger Verflüchtigung des Alkohols zur Bildung der oben erwähnten Tröpfchen führt.

Man kann sich von der Existenz dieser Strömungen leicht überzeugen bei Lösungen von Harzen oder Farbstoffen (z. B. Gummigutt), welche beim Eindunsten einen feinkörnigen Niederschlag ausscheiden. Die Partikelchen werden dann durch die Flüssigkeit mitgeführt, lassen also den Verlauf der Strömungslinien erkennen.

Die Oberfläche der Flüssigkeit erscheint infolge der Wirbel, wie die Fig. 2799 und Fig. 2800 andeuten, in polygonale Felder geteilt, an deren Grenzen die Flüssigkeit absteigt, während sie in der Mitte nach oben geht, so daß also die untersten Teilchen der Flüssigkeit vom Rande der Polygone gegen die Mitte hin sich bewegen, während die an der Oberfläche befindlichen entgegengesetzte Bewegungsrichtung haben.

Die Fig. 2801 zeigt nach Sachs eine Emulsionsfigur, entstanden in einer Emulsion von mit Alkanna gefärbten Öltröpfchen in einem nur wenig schwereren Gemisch von Alkohol und Wasser in einem Teller.

323. Firnisse. Läßt man eine Harzlösung auf einer Glasplatte verdunsten, so hinterläßt sie einen zusammenhängenden, glasigen (amorphen) Überzug (Firnis).

Verdunstet Gummilösung auf einer Glasplatte, so entsteht ebenfalls ein Firnis, der sich aber abschält und vielfach von Sprüngen durchzogen ist infolge der Kontraktion der amorph erstarrten Masse bei weiterem Verdunsten des Wassers (Projektion).

Im allgemeinen zeigen die Firnisse eine Neigung zur Zerreißung in polygonale Felder, weil nämlich durch die eben beschriebene Kontaktbewegung und Verdunstung, insbesondere bei gleichzeitiger Auflösung mehrerer Substanzen, die Zusammensetzung eine ungleichmäßige wird und demgemäß auch die Kontraktion bei fortgesetztem Eintrocknen und die Widerstandskraft gegen die auftretenden Spannungen. Es zerfällt deshalb eine eintrocknende Firnisschicht mit der Zeit in polygonale Platten oder Prismen, vergleichbar den Basaltsäulen, deren Entstehung wohl auf ähnliche Strömungen beim Erkalten der flüssigen Masse zurückzuführen ist.

Die meisten Lösungen hinterlassen (namentlich bei langsamer Verdunstung) nicht eine amorphe, sondern kristallinische feste Schicht. Beispielsweise gibt Fuchsin in Äther gelöst auf einer Glasplatte rasch verdunstend einen glatten, glänzenden, amorphen Überzug, in Alkohol gelöst langsam verdunstend einen rauhen kristallinischen.

324. Kristallzucht. Eine Substanz, die sehr leicht, selbst bei rascher Ausscheidung, in scharfkantigen Kristallen zu erhalten ist, ist Azobenzol. Man löst nach Landolt die Substanz in Äther mit etwas Alkohol, breitet die Lösung auf einer reinen Glasplatte auf dem Apparate für Horizontalprojektion aus und läßt sie verdunsten. Ebenso eignen sich eine Lösung von Chloralhydrat in Alkohol mit etwas Äther und eine Lösung von essigsaurem Natron in wässerigem Alkohol.

Kohl gibt folgendes Rezept. Man löse schwefelsaures Natron in warmem Bier auf, so viel als aufgenommen wird, und bringe die warme Flüssigkeit mittels der Pipette auf eine der Glaswände der Küvette, sie dort möglichst ausbreitend. In wenigen Augenblicken wird man baumartige Gebilde entstehen sehen, ganz ähnlich denen, welche der Frost an den Fensterscheiben erzeugt.

Am schönsten läßt sich die Kristallbildung mittels des Projektionsmikroskops zeigen z. B. bei einer Lösung von α-naphtylaminsulfosaurem Natrium in Wasser oder Schwefel in Schwefelkohlenstoff.

Substanzen, die leicht in schönen großen Kristallen gezogen werden können, sind Alaun und Kupfervitriol. Man stellt sich eine gesättigte Lösung des Salzes her, gießt sie in eine flache Schale, sogenannte Kristallisierschale, legt ein Fragment eines Kristalles auf den Boden und überläßt nun die Lösung längere Zeit sich selbst (Fig. 2802). In dem Maße, als sie verdunstet, wächst der Kristall weiter und man hat nur nötig, ihn zeitweise auf eine andere Fläche zu legen, um ganz regelmäßige Formen zu erhalten. Haben sich neben dem eingelegten Kristall, wie es häufig geschieht, noch andere kleine Kristalle abgesetzt, so entfernt man diese oder man filtriert, wenn es zu viele sind, die Lösung und setzt dann den zu züchtenden Kristall aufs neue ein.


Fig. 2802.


Fig. 2803.

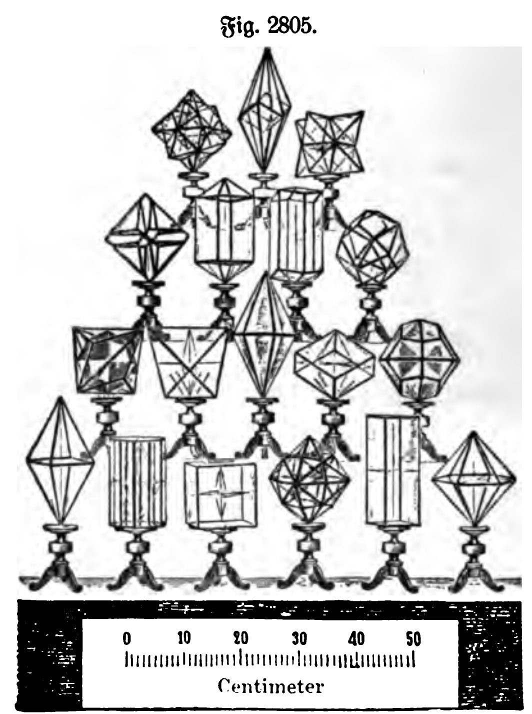
Zweckmäßig kann man auch in der Weise verfahren, daß man den Kristall an einem Haar, feinem Faden oder Draht aufhängt (Fig. 2803), oder (nach H. Kopp) ihn mit Wachs an eine Glasröhre befestigt, welche natürlich beim Weiterwachsen eingeschlossen wird und dann als Stativ dient. Ferner ist es zweckmäßig, das Kristallisationsgefäß mit einem Blatt Filtrierpapier zu bedecken, um das Einfallen von Staub zu hindern und den Verdunstungsprozeß etwas zu verzögern. Die Züchtung von Kristallen auf diesem Wege beansprucht mehrere Monate, kann also nicht während einer Vorlesung demonstriert werden.

Fig. 2804.



Manche Salzlösungen verdunsten sehr schnell oder ziehen umgekehrt Wasser aus der Luft an. Solche stellt man auf einen Dreifuß über eine eben geschliffene Glasplatte, setzt unter den Dreifuß eine Schale mit Schwefelsäure und bedeckt das Ganze mit einer unten abgeschliffenen und befetteten Glasglocke[1]).

Fig. 2805.



Misch- und Schichtkristalle. Mischt man Lösungen von gewöhnlichem und Chromalaun, so scheiden sich daraus beim Verdunsten Mischkristalle beider Substanzen aus, wie leicht an deren Färbung erkannt werden kann, die je nach dem Mischungsverhältnis sich mehr oder weniger der des reinen Chromalauns nähert.

[1]) Sammlungen künstlicher Kristalle nach Fig. 2804 liefert Franz Hugershoff, Leipzig, Carolinenstr. 13, zu 8 bis 300 Mk. Von einzelnen besonders ausgesuchten schönen großen Schaustücken werden folgende zu den angegebenen Preisen geliefert. Triklines System: Kupfervitriol, etwa 1000 g, 10 Mk. Monoklines System: Schwefelsaures Magnesium-Kalium, etwa 250 g, 12 Mk.; Rotes Blutlaugensalz, etwa 500 g, 12 Mk. Rhombisches System: Schwefelsaures Kalium, etwa 250 g, 12 Mk.; Bittersalz, etwa 1000 g, 12 Mk. Quadratisches System: Doppelphosphorsaures Ammonium, Prismen von 15 cm Länge, 7,50 Mk. Hexagonales System: Schwefelsaures Natrium-Kalium, etwa 250 g, 12 Mk. Reguläres System: Chromalaun, etwa 1000 g, 12 Mk.; Eisenalaun, etwa 1000 g, 12 Mk.; Chromtonerdealaun, etwa 1000 g, 12 Mk.; Kalialaun, Würfel, etwa 1000 g, 15 Mk. Dieselbe Firma liefert Kristallmodelle aus Tafelglas nach Fig. 2805 das Stück zu 2 bis 15 Mk., Sammlungen von Modellen aus Pappe, 15 bis 20 cm groß, 4,5 bis 225 Mk.; solche aus weißer Kompositionsmasse 50 Stück in Kiste zu 17,50 Mk.

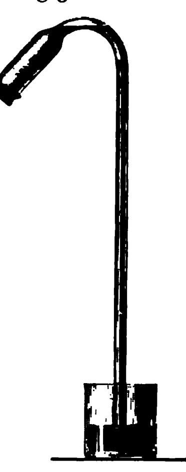
Hängt man in gesättigte Lösung von gewöhnlichem Alaun einen Kristall von Chromalaun ein, so wächst er in dieser regelmäßig weiter, die neu angelagerte Schicht ist aber, weil eben aus gewöhnlichem, nicht aus Chromalaun bestehend, vollkommen farblos, nicht violett, man erhält somit einen Schichtkristall, bestehend aus violettem Kern und farbloser Hülle. Umgekehrt kann man einen gewöhnlichen Alaunkristall von Chromalaun umwachsen lassen. Um in diesem Falle die Schichtung zu erkennen, ist es nötig, den Kristall mit einer feinen Laubsäge durchzuschneiden und mit etwas Wasser auf einer matten Glasplatte eben zu schleifen. (In Fig. 2804 sind solche Schichtkristalle dargestellt.)

Chemische Verbindungen. a) Molekularverbindungen. Löst man weißen wasserfreien Kupfervitriol in Wasser auf, so entstehen beim Verdunsten die blauen Kristalle des wasserhaltigen Kupfervitriols.

Läßt man erst Salmiak allein auf dem Objektträger eines Mikroskops kristallisieren, dann Kupferchlorid (oder Platinchlorid) und schließlich ein Gemisch beider Lösungen, so erhält man im letzteren Falle ganz andere Kristalle als in den beiden ersten Fällen, nämlich Kristalle des Doppelsalzes. Sie enthalten beide Substanzen in sich, unterscheiden sich aber von Mischkristallen dadurch, daß sie ganz andere Kristallform besitzen und die beiden Bestandteile in stets gleichem, ganz bestimmtem Mengenverhältnis enthalten.

b) Atomverbindungen. Salzsäure allein scheidet beim Verdunsten keine Kristalle ab, ebensowenig Ammoniak. Ein Gemisch beider Flüssigkeiten hinterläßt aber Salmiakkristalle.

Fig. 2806.



325. Auffangen durch Verdunstung. Um das Nachziehen von Wasser durch verdunstende Flächen zu zeigen, verwendet Tollens einen Trichter mit langem engem Rohre, Fig. 2806, welcher mit Blase zugebunden und mit Wasser gefüllt ist. Derselbe taucht in ein mit Wasser gefülltes Gefäß, welches unten etwas durch Jod gefärbtes Chloroform enthält. Verdunstet nun das Wasser an der Oberfläche der Blase, so wird entsprechend eine Säule von dem gefärbten Chloroform in das Rohr eingesaugt.

326. Kapillarität und Dampftension. An konvexen Flächen ist die Dampftension etwas kleiner, an konkaven etwas größer als an ebenen, wie sich durch Betrachtung des Gleichgewichts der Flüssigkeit in einer Kapillare und außerhalb derselben ergibt auf Grund des später zu besprechenden II. Hauptsatzes der Thermodynamik. An dieser Stelle kann nur auf das Faktum hingewiesen werden, daß z. B. kleine Tröpfchen in dampferfülltem Raum neben größeren Flüssigkeitsmassen nicht dauernd bestehen können, sondern allmählich verdampfen, wobei eine entsprechende Menge Dampf sich an der weniger gekrümmten Fläche kondensiert. Da konstante Temperatur vorausgesetzt wird, ist der Nachweis sehr schwierig.

327. Efflorescenz und Kristallisationskraft. Das „Ausblühen" von Salz auf porösen Stoffen, die mit Salzlösung getränkt sind, d. h. das Herauswachsen von Kristallen in die Luft, das „Überkriechen" wachsender Salzkrusten über die Gefäßränder, was infolge Heberwirkung ein Auslaufen der Lösung bedingen kann,

und ähnliches beruht auf der Existenz einer eigentümlichen Kraft, welche bedingt, daß immer zwischen Kristall und Unterlage eine dünne Flüssigkeitsschicht verbleibt.

Fig. 2807.



Wenn z. B. Chlorkaliumkristalle auf Kieselsäuregallerte wachsen, so wachsen sie aus dieser Masse in die Luft hinaus, nicht etwa in der Art, daß sich die Lösung kapillar an ihnen emporzieht, sondern indem sie an der Auflagefläche neues Material aus der Lösung heranziehen und dadurch sich selbst emporheben (Fig. 2807). Die Kraft dieser Verschiebung ist so beträchtlich, daß sie entgegenstehende Hindernisse, z. B. starke poröse Tongefäße, in welchen sie sich bilden, fortschieben, ja sogar in kleine Bruchstücke zerdrücken können. Ebenso vermögen sie Erde oder Mauern, in welchen sie sich bilden, zu lockern.

328. **Dampfspannung von Gemengen.** Derselbe Apparat, der zum Nachweis der Dampftension überhaupt diente, eignet sich auch zur Demonstration der Änderung, welche die Dampftension durch Zumischung einer zweiten Flüssigkeit oder durch Auflösung eines festen Körpers erfährt.

Man füllt in zwei der Röhren die reinen Flüssigkeiten, in die dritte ein Gemenge beider.

So kann man namentlich die Summation der Dampfspannungen nicht mischbarer und das abweichende Verhalten mischbarer Flüssigkeiten nachweisen.

Mischt man z. B. Alkohol und Wasser oder Alkohol und Schwefeläther, so erhält man Dampftensionen, welche das arithmetische Mittel derjenigen der Komponenten sind. Nimmt man dagegen Wasser und Schwefeläther, oder Wasser und Schwefelkohlenstoff, d. h. irgend zwei Flüssigkeiten, welche sich nicht mischen, so ist die resultierende Dampftension unabhängig vom Mengenverhältnis und stets gleich der Summe der einzelnen Tensionen.

Zur Vergleichung kleiner Verschiedenheiten der Dampfspannung, z. B. bei verschieden konzentrierten Salzlösungen, dienen verzweigte, eventuell abgekürzte Barometer, sogenannte Differentialtensimeter. Der in Fig. 2785, S. 1017, dargestellte Apparat kann als ein solches betrachtet werden.

Ein besonders wichtiger Fall ist der der Mischung von Wasser und Schwefelsäure, oder von Wasser und Phosphorsäure, oder der Lösung von Chlorcalcium in Wasser. Die Dampftension des Gemenges wird bei relativ geringer Wassermenge unmerklich klein. Bei sehr verdünnten Lösungen ergeben sich Beziehungen zum Molekulargewicht, die erst in dem Kapitel Thermodynamik besprochen werden können.

329. **Hygroskopische Körper.** Verbindet man zwei Gefäße, von denen das eine mit konzentrierter Schwefelsäure, das andere mit Wasser halb gefüllt ist, so daß die Dämpfe durch das Verbindungsrohr diffundieren können, so zieht die Schwefelsäure nach und nach alles Wasser an sich, da dicht an ihrer Oberfläche die Spannung des Wasserdampfes nahe gleich Null sein muß. Es findet ein fortwährendes Destillieren des Wassers nach der Schwefelsäure hin statt.

Man nennt Körper, die Wasserdampf absorbieren, hygroskopische. Als Beispiele fester hygroskopischer Körper kann man wählen feste wasserfreie Phosphorsäure und Chlorcalcium, am besten erstere.

Man versieht zwei sogenannte Exsiccatoren, oder, in Ermangelung solcher, zwei Cylindergläser mit abgeschliffenem und eingefettetem Rande mit kleinen Dreifüßchen

aus Draht. In den einen gibt man etwas Phosphorsäure, um die Luft darin zu trocknen, in den anderen Wasser, um sie feucht zu erhalten. Füllt man nun zwei gleiche Uhrgläser mit Phosphorsäure, setzt sie in die Cylindergläser auf die Dreifüßchen und bedeckt nun die Gläser mit eben geschliffenen Glasplatten, so bemerkt man bald, daß die Phosphorsäure in dem Wasser-enthaltenden Gefäße feucht wird und schließlich ganz zerfließt, während die andere ungeändert bleibt.

Befindet sich ein Schälchen mit Phosphorsäure auf der Wage, so kann man eine stetige Gewichtszunahme konstatieren.

Verschiedene Formen von Trockenapparaten, Waschflaschen u. s. w. sind bereits oben, S. 571, beschrieben worden.

Exsiccatoren sind Gefäße, welche eine hygroskopische Substanz, z. B. Schwefelsäure enthalten, um darin chemische Niederschläge u. s. w. trocknen, oder das Anziehen von Wasser durch dieselben verhindern zu können.

Fig. 2808.

Bei der Konstruktion von Hempel[1]), welche der Tatsache Rechnung trägt, daß Wasserdampf leichter ist als Luft, somit zweckmäßig das Trockenmittel am Deckel angebracht werden muß, ist, wie aus Fig. 2808 und 2809 zu ersehen, der Deckel so gestaltet, daß beim Hinlegen keine Schwefelsäure ausfließen kann.

330. Absorptionshygrometer. Im Zustande der Sättigung enthält die Luft pro Kubikmeter etwa ebensoviel Gramm Wasser in Form von Wasserdampf, als die Temperatur in Graden Celsius beträgt, nämlich dieselbe Menge, die ein Kubikmeter Vakuum aufnehmen würde. Beispielsweise vermag sie bei 15° C. 12,8 g Dampf aufzunehmen. Um dies nachzuweisen, kann man Luft aus einem mit feuchtem Fließpapier gefüllten Kasten durch eine mit konzentrierter Schwefelsäure beschickte abgewogene Trockenröhre mittels eines Aspirators hindurch saugen und die Gewichtszunahme der Trockenröhre bestimmen. Das ausgeflossene Wasser gibt das Volumen der durchgesaugten Luft.

Fig. 2809.



Hätte z. B. das Gewicht der Röhre während des Hindurchleitens von 20 Liter Luft um 0,268 zugenommen, so wären in 20 Liter Luft 0,268 g und somit in 1000 Liter oder in 1 cbm 50 . 0,268 = 13,4 g Wasserdampf enthalten.

Zweckmäßig schaltet man zwei Trockenröhren hintereinander, um sich durch Konstanz des Gewichtes der zweiten Röhre davon zu überzeugen, daß keine Feuchtigkeit durch die erste hindurchgegangen ist, auch schaltet man vor den Aspirator eine mit Schwefelsäure gefüllte Waschflasche, um Zurücktreten feuchter Luft aus dem Aspirator zu hindern. Der Anschluß der zu wägenden Trockenröhren wird mittels Quecksilberverschluß (vergl. S. 281, Fig. 671) bewirkt, um sie leicht einsetzen und entfernen zu können.

Ermittelt man nun etwa in einem Zimmer mittels eines solchen Absorptions-

[1]) Exsiccatoren nach Hempel (Zeitschr. f. angew. Chem. 1899, S. 200), bei welchen sich die Schwefelsäure im Deckel befindet, so daß, weil die feuchte Luft spezifisch leichter als die trockene ist, ein bedeutend schnelleres Trocknen erzielt wird, liefert Muencke, Berlin, zu 4 bis 10 Mk.

hygrometers die tatsächlich pro Kubikmeter vorhandene Wasserdampfmenge, die sogenannte absolute Feuchtigkeit, so findet sich dieselbe in der Regel kleiner $= q$, die Luft ist nicht gesättigt. Das Verhältnis q/Q nennt man die relative Feuchtigkeit der Luft. Gewöhnlich wird sie in Prozenten angegeben, d. h. der Wert des Quotienten $100 . q/Q$. Diese hundertfache relative Feuchtigkeit wird auch Feuchtigkeitsgrad genannt.

Enthält z. B. 1 cbm Luft 12,5 g Wasserdampf, so ist die absolute Feuchtigkeit 12,5. Beträgt ferner die Lufttemperatur 20° C., so könnten in 1 cbm Luft 17,03 g Wasserdampf enthalten sein; die relative Feuchtigkeit ist somit 12,5 : 17,03 = 0,73 und der Feuchtigkeitsgrad gleich 73.

Looser (Z. 8, 302, 1895) weist die Luftfeuchtigkeit nach, indem er in ein mit Manometer verbundenes Glasgefäß (Thermoskop) etwas konzentrierte Schwefelsäure einfüllt und zeigt insbesondere auf diese Art den Unterschied des Feuchtigkeitsgehaltes der ein- und ausgeatmeten Luft, sowie der Zimmerluft zu Beginn und am Schluß einer Vorlesung [1]).

331. **Chemische Absorption.** Sowohl bei der Lösung von Gasen in Flüssigkeiten, wie auch bei Absorption durch feste Körper ist es im allgemeinen schwierig zu entscheiden, ob lediglich physikalische Mischung oder chemische Verbindung eingetreten ist. Die Fälle der Verbindung wasserfreier Substanz mit Kristallwasser sind, wie schon früher erörtert, als eine Art chemischer Verbindungen aufzufassen (Molekularverbindungen). Hierher gehört z. B. das Wasseranziehen durch Chlorcalcium oder wasserfreier Phosphorsäure, ferner das Rötlichwerden von mit Kobaltchlorürlösung getränktem Papier bei feuchtem Wetter und die Blaufärbung bei eintretender Trockenheit [2]).

Das Zinnchlorid vermag ebenfalls aus der Luft Wasser anzuziehen und sich damit chemisch zu verbinden. Gießt man eine kleine Quantität davon in eine flache Glasschale (Kristallisierschale) und läßt diese mit Papier bedeckt einige Zeit stehen, so findet man dann die Masse fest geworden und in die wasserhaltige Verbindung verwandelt. Gießt man etwas Zinnchlorid in einen Kolben und läßt denselben unbedeckt einen Tag lang stehen, so findet sich der Hals desselben mit festgewordenem Zinnchlorid vollständig verstopft [3]).

Man kann die chemische Absorption dazu benutzen, mit einer mangelhaften Luftpumpe ein hohes Vakuum herzustellen, beispielsweise kann man den Rezipienten, nachdem man in Papier gewickelten gebrannten Kalk hineingebracht und ihn mit Kohlensäure gefüllt hat, entleeren und dann abschließen; der Rest von Kohlensäure wird nach einiger Zeit vom Kalke absorbiert.

Andrews (1853) bringt zu diesem Zwecke unter den Rezipienten ein Schälchen mit kaustischer Kalilauge und ein zweites mit konzentrierter Schwefelsäure. (Ebenso Fontaine, 1852 [4]).

Benedikt (1902) bringt auf den Boden eines Hempelschen Exsiccators,

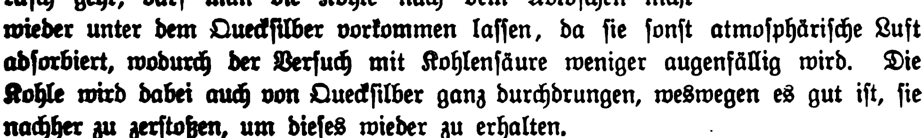
[1]) Zu den Absorptionshygrometern gehört auch das von Dr. Edelmann in München zu beziehende „Normalhygrometer". — [2]) Solche Wetterbilder liefert C. Himmelsbach, Mechaniker, Lahr i. B. — [3]) Über Bildung von Tonerdehydriten an Aluminiumamalgam siehe Wied. Ann. 59, 664, 1896 und Elektrotech. Zeitschr. 18, 83, 1897. — [4]) Hier wäre auch die Beseitigung des Quecksilberdampfes aus den Rezipienten von Quecksilberluftpumpen durch Blattsilber oder Blattgold zu erwähnen.

dessen obere Abteilung konzentrierte Schwefelsäure enthält, etwa 10 ccm wasserfreien Äthers, evakuiert mit der Wasserluftpumpe, und schließt ab; infolge der Absorption des Ätherdampfes durch die Säure entsteht in wenigen Minuten ein Vakuum von 1 bis 4 mm Druck.

332. Absorption von Gasen durch Flüssigkeiten. Auf der Verdichtung einer Gasschicht an der Oberfläche von Flüssigkeiten beruht wahrscheinlich die eigentümliche Erscheinung, daß Tropfen einer Flüssigkeit auf einer größeren Masse derselben Flüssigkeit rollen können. Hierauf gründet sich Gossarts Homöotrop. Es besteht aus einer Pipette und einer sechseckigen, mit hyperbolisch eingebogenen Wänden versehenen Schale von etwa 4 ccm Inhalt. Infolge der Form der Schale erhebt sich eingegossener Alkohol gegen die Wände hin, so daß Alkoholtropfen, die man aus der Pipette aus etwa 1 mm Abstand in der Nähe der Wände herunterfallen läßt, auf der Oberfläche gegen die Mitte hinrollen, da die absorbierte Luftschicht eine wirkliche Berührung hindert. Mischt man dem Alkohol in der Pipette mehr und mehr Aceton zu, so hört schließlich bei 30 Proz. das Rollen der Tropfen auf. Findet es noch statt und setzt man dem Alkohol in der Schale 1 bis 2 Proz. Aceton zu, so hört es ebenfalls auf, man kann somit durch solche Probe Alkohol und ähnliche Flüssigkeiten auf vorhandene Unreinigkeiten prüfen.

333. Absorption der Gase durch feste Körper. In einer etwa fingerweiten, einerseits zugeschmolzenen Glasröhre fängt man Ammoniak oder Kohlensäure über Quecksilber auf. (Fig. 2810 Lb, 1,50). Das Quecksilber kommt in ein niedriges Trinkglas, oder besser in eine Quecksilberwanne aus Porzellan, welche vermöge ihrer zweckmäßigen Form nur wenig Quecksilber erfordert. Man kann dieselbe noch in ein dickes, nur wenig größeres Brett einlassen und dieses mit einem Rahmen umgeben, so daß man vor Verlust des Quecksilbers vollkommen gesichert ist.

Fig. 2810.



Ist nun die Röhre mit Ammoniak oder Kohlensäure gefüllt, so kann man ein kleines Stückchen gut ausgeglühte Kohle mit einem aus Draht gebogenen federnden Zängchen fassen, glühend unter das Sperrquecksilber tauchen und so in das mit Kohlensäure gefüllte Gefäß bringen. Die Kohle absorbiert rasch einen großen Teil des Gases. Eben weil die Absorption sehr rasch geht, darf man die Kohle nach dem Ablöschen nicht wieder unter dem Quecksilber vorkommen lassen, da sie sonst atmosphärische Luft absorbiert, wodurch der Versuch mit Kohlensäure weniger augenfällig wird. Die Kohle wird dabei auch von Quecksilber ganz durchdrungen, weswegen es gut ist, sie nachher zu zerstoßen, um dieses wieder zu erhalten.

Kolbe benutzt eine mit dem zu untersuchenden Gase gefüllte Flasche, welche mit dem einen Monometer des Differentialmanoskops in Verbindung steht. Wird z. B. frisch geglühte Holzkohle oder Torfmoos eingebracht und sodann die Flasche luftdicht verschlossen, so sieht man bald an der Änderung des Flüssigkeitsstandes, daß ein Teil des Gases absorbiert wird. Zum Ausglühen der Kohle (am besten Lindenkohle) empfiehlt er, sie zwischen zwei löffelförmigen Eisendrahtnetzen, deren Stiele durch ein Scharnier verbunden sind, über einer Bunsen- oder Spiritus-

flamme zu erhitzen. Die ausgeglühte Kohle kann man in einem gußeisernen Gefäß unter gebrauchtem, unreinem Quecksilber abkühlen, indem man die Kohlenstücke vermittelst obiger Vorrichtung unter das Quecksilber drückt. Die abgekühlten Kohlenstücke kann man in einem hermetisch geschlossenen Glasgefäß aufbewahren, aber nicht länger als ein bis zwei Tage, da sie sonst wieder ausgeglüht werden müssen.

334. **Hauchbilder.** Mit Hilfe feiner Wagen ist man im stande, das Gewicht und damit die Dicke der Wasserhaut zu bestimmen, die sich auf gewöhnlichem Glas findet, wenn dasselbe in feuchter Luft aufbewahrt wird. Sie bildet sich durch eine chemische Wirkung des im Glas enthaltenen Alkalis, welches Wasserdampf an sich zieht. Stärker absorbierende Stoffe, wie Kohle, beseitigen sie.

Schreibt man mit einer frisch ausgeglühten Kohle oder mit einem hölzernen Stäbchen auf einer Glasplatte oder zieht man mit einem an einem Stäbchen hängenden Wassertropfen Figuren darauf, ohne daß das Wasser an der Platte hängen bleibt, so treten die Figuren beim Anhauchen hervor.

Man schneide aus einem Kartenpapier eine beliebige Figur heraus und lege das Papier auf eine Glasplatte, die man nun behaucht; ist der Beschlag wieder abgelaufen, so entfernt man das Papier und behaucht die Platte nochmals; die früher nicht bedeckten Stellen kondensieren den Wasserdampf anders als die bedeckten, und dadurch wird die Figur derselben sichtbar. Der Versuch kann öfter und nach längerer Zeit noch mit Erfolg wiederholt werden.

Auf eine gut mit frisch geglühtem Trippel abgeriebene Glasplatte oder auf eine mit dem gleichen Material und Terpentinöl mittels eines Bausches von gekardeter Baumwolle geputzte und nachher mit feinstem Polierrot und Baumwolle polierte Platte von silberplattiertem Kupfer stellt man ein Petschaft von Metall oder Stein, welches nicht frisch gereinigt wird, und läßt dasselbe einige Stunden darauf stehen. Die Platten zeigen beim Behauchen das Bild des Stempels. Es kann auch umgekehrt der Stempel frisch gereinigt sein anstatt der Platte. Auch ohne frische Reinigung erhält man mitunter Bilder, jedoch nur nach längerer Zeit. Temperaturdifferenz beider Körper befördert die Abbildung. Setzt man die Bilder auf der Silberplatte im Dunkeln Joddämpfen aus, wie sich dieselben bei gewöhnlicher Temperatur aus dem Jod entwickeln, so werden sie sichtbar, oder treten wenigstens hervor, wenn man die jodierte Platte nachher an das Tageslicht bringt. Münzen sind zu diesen Versuchen weniger geeignet als Petschafte, besonders wenn letztere auf einer reinen Fläche nur eine einfache Zeichnung oder Schrift tragen.

Um reine Quecksilberoberflächen für Kapillarversuche zu erhalten, benutzt man nach W. C. Röntgen (1892) einen Glastrichter. Das Quecksilber tritt unten in die Spitze des Trichters, durch eine mit Siegellack eingekittete Glasröhre zugeleitet, ein und läuft am Rande über. Ein schwacher Strom von Leuchtgas gegen die Quecksilberoberfläche gerichtet, reicht aus, dieselbe so zu verunreinigen, daß sich Wasser nicht mehr darauf ausbreitet.

335. **Absorption von Gasen durch feste Körper.** Nach Hempel (1882) läßt sich die Absorptionsfähigkeit des Gummis im Vorlesungsexperiment sehr schön in der Weise zeigen, daß man einen Kohlensäureentwickelungsapparat oder einen Gasometer mit Stickoxydulgas durch einen langen Gummischlauch mit einer Glasröhre verbindet, welche in eine gefärbte Flüssigkeit taucht und dann durch einen starken Gas-

strom alle Luft aus dem Schlauch verdrängt. Nach dem Absperren des Gaszuflusses steigt dann die gefärbte Flüssigkeit langsam in die Glasröhre zurück, ein Zeichen, daß das im Schlauch eingeschlossene Gasvolumen sich durch Absorption vermindert; fände Diffusion statt, so müßte das Gasvolumen sich vergrößern, da das spezifische Gewicht der CO_2 und des N_2O größer ist als das der Luft.

Bringt man einen gedruckten Holzschnitt in ein Gefäß, in welchem sich etwas Schwefelammonium befindet, so werden die Dämpfe des letzteren von der Buchdruckerschwärze absorbiert; preßt man denselben also nachher mit einem Papier zusammen, welches mit Bleizuckerlösung behandelt worden war, so entsteht auf diesem ein genaues Abbild des Holzschnittes, weil überall da, wo der Schwefelwasserstoff auf das Bleisalz einwirkt, d. h. an den mit Schwärze bedruckten Stellen, ein schwarzer Niederschlag von Schwefelblei entsteht. (Polyt. C.-Bl. 1857.)

Rischbieth (Z. 15, 75, 1902) empfiehlt zur Demonstration der Occlusion des Wasserstoffs durch Palladiumschwamm, sowie von Kohlensäure durch geglühte Holzkohle die oben S. 1004 erwähnte Gasbürette (Fig. 2769). Er bringt die Stoffe (2 g Palladiumschwamm in Asbestpapier gehüllt) in den Trichteraufsatz *B* der Bürette, nachdem dieselbe bereits mit dem Gase gefüllt war, setzt sodann einen gut passenden Kautschukpfropfen zunächst lose auf, dreht den oberen Hahn um 180°, so daß sich auch der Trichter mit Gas füllt, setzt nun den Stopfen fest ein und verbindet die Auslaufspitze *E* mit dem Schlauch des Niveaugefäßes *B*.

Die Wirkungen des Platinschwammes auf Knallgas, d. h. Entzündung von ausströmendem Wasserstoff oder Leuchtgas, sind als katalytische aufzufassen. Knallgas ist ein instabiles Gebilde, die Reaktionsgeschwindigkeit ist aber bei gewöhnlicher Temperatur unmerkbar klein. Bei 300° beobachtet man erst nach Tagen eine merkliche Volumenabnahme. Bringt man aber fein zerteiltes Platin hinzu, so erfolgt Entzündung selbst bei — 20°.

Schweflige Säure mit Luft gemischt über feinverteiltes Platin geleitet, verbrennt zu Schwefelsäure, Salzsäure mit Luft bei 400° über Ziegelsteine, die mit Kupfersalzen getränkt sind, geleitet gibt Chlor u. s. w.

Auch die Entglasung von Zucker, arseniger Säure, Umwandlung von Pseudochlorcarbostyril und ähnliche durch Absorption von Feuchtigkeit bedingte Erscheinungen können hier erwähnt werden, obschon es sich wohl zunächst nur um Absorption handelt, die eine Wasserhaut erzeugt, in der sich der Körper auflöst[1]).

336. Hygrometer. Während Phosphorsäure den einmal angezogenen Wasserdampf nicht mehr abgibt, auch wenn sie in ganz trockene Luft gebracht wird, so geben ihn dagegen leim- und hornartige Körper ganz in dem Maße wieder ab, wie sich der Feuchtigkeitsgehalt der Luft mindert. Es gehören dahin z. B. Gelatineblättchen, sogenannte Hauchbilder, welche beim Behauchen sich zusammenrollen und dann wieder ausdehnen (durch Firnissen einer Seite würde man die gleiche Erscheinung auch in gleichmäßig feuchter Atmosphäre erhalten können[2]), ferner Darmsaiten, Haare, verschiedene Pflanzenfasern, Kristalloide, Zeolithe.

Gewöhnlich wird eine dicke Darmsaite von etwa 5 bis 10 cm Länge einerseits befestigt und andererseits mit einem Zeiger versehen. Auf der Rückseite einer

[1]) Über künstliche Färbung von Kristallen der Haloidsalze durch Kalium- und Natriumdampf siehe Physik. Zeitschr. 1901, S. 115. — [2]) Nach Prometheus 4, 526, 1893 eignet sich ein Streifen Gelatinefolie von 10 bis 15 cm Länge und 5 mm Breite.

menschlichen Figur ist ein Federkiel befestigt; in diesem steckt die Saite und ist an abgewendeten Ende des Kiels befestigt, während das vordere Ende der Saite durch die Figur reicht und den einen Arm derselben trägt, welcher nun durch seine Bewegung als Zeiger dient.

Außer diesen Spielereien gehören hierher das Holz- und Haarhygrometer. Alle beide haben eine in 100 Tle. geteilte Skala. Den Nullpunkt erhält man, indem man das Instrument zugleich mit Chlorcalcium oder Nordhäuser Schwefelsäure unter eine Glasglocke bringt und den Ort des Zeigers bemerkt, wenn derselbe einen festen Stand angenommen hat, was in sechs Stunden geschehen sein muß[1]). Der Punkt 100 ist der Punkt der größten Feuchtigkeit, und man erhält ihn, indem man das Instrument mit nassem Fließpapier unter eine Glasglocke bringt. Es ist unrichtig, wenn man, wie wohl auch und namentlich von de Luc vorgeschrieben wird, das ganze Instrument in Wasser taucht, um den Punkt der größten Feuchtigkeit der Luft zu erhalten.

Fig. 2811.

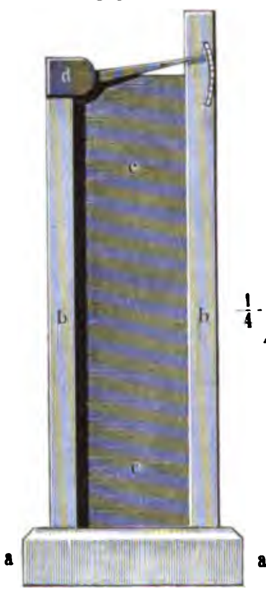


Fig. 2812.

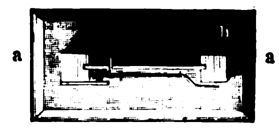


Fig. 2813.



a) Das Holzhygrometer. Fig. 2811 und 2812 zeigen dasselbe in Grund- und Aufriß. Auf einem Brettchen *aa* sind zwei hölzerne Stäbe aus hartem Holze, dessen Fasern der Länge nach laufen, vertikal eingeleimt, die auf den einander zugekehrten Seiten Nuten haben, in welche das nur höchstens 3 mm dicke tannene Brettchen *c* geschoben ist, dessen Fasern senkrecht gegen die Stäbe laufen; es wird von feinfaserigem astfreiem Holze genommen und muß in den Nuten vollkommen frei beweglich sein. Auf einem der Stäbe ist ein Blech *d* befestigt, auf dessen Rückseite sich ein Zapfen *e*, Fig. 2813, befindet. An dem ersten Absatze steckt lose ein Zeiger und dieser wird durch ein Ringchen *f* zurückgehalten, welches auf den zweiten Absatz des Zapfens gesteckt und über dem derselbe vernietet wird. Der Zeiger muß frei beweglich sein und ruht mittels eines nahe am Drehpunkte eingenieteten Zapfens auf dem Brettchen *c*, welches folglich den Zeiger hebt, wenn es sich infolge der Feuchtigkeit ausdehnt; zieht es sich aber zusammen, so sinkt der Zeiger durch seine eigene Schwere nach. Auf dem anderen Stabe wird dann die Skala verzeichnet.

b) Das Haarhygrometer ist weit brauchbarer, da man den hygroskopischen Körper, ein durch Kochen mit schwacher alkalischer Lauge entfettetes, nicht krauses, am besten blondes Menschenhaar, immer wieder leicht bekommen kann; ein solches Haar dehnt sich vom Zustande der größten Trockenheit bis zu jenem der größten Feuchtigkeit um etwa $^1/_{50}$ seiner Länge aus. Fig. 2814 und 2815 zeigen ein solches Instrument in $^1/_2$ bis $^2/_3$ der natürlichen Größe (Fig. 2815 von der Rückseite). In einem messingenen Rahmen *aa*, der noch in einen hölzernen gesetzt wird, welcher

[1]) Manche Hygrometer sollen hierdurch Schaden leiden.

it Glasschiebern versehen ist, befindet sich oberhalb einerseits ein kleines Ziffer-latt *b* und anderseits der Bügel *c*. Sie tragen miteinander die Zapfen einer Welle, ren Umfang etwas mehr als $^1/_{50}$ der Länge des Haares beträgt; an dem Zapfen uf der Seite des Zifferblattes ist durch Reibung ein Zeiger in seinem Schwer-unkte aufgesteckt. Am anderen Ende des messingenen Rahmens befindet sich n Nagel, der durch Reibung feststeckt und noch, wie in Fig. 2816, durch einen Zaum gehalten wird. Man kann un das Haar direkt an diesem Nagel befestigen, sein nderes Ende um die Welle schlingen und ein kleines Gegen-ewicht von etwa 15 cg daran binden, so wäre das Instru-nent fertig bis auf die bereits angegebene Graduierung. Statt des Gegengewichtes, welches beim Transporte des Instrumentes stört, kann man auch eine feine Spiralfeder us Silberlahn, wie die Figur zeigt, anbringen; sie muß ber etwas lang genommen werden, um für die ganze Länge er Bewegung ziemlich gleichen, jedenfalls 15 cg nicht über-steigenden Widerstand zu geben, weil sich sonst das Haar recken würde. Wird das Haar auf die angegebene Art ebst um die Welle geschlungen, so ist man unsicher über ie Teilnahme des umschlungenen Anteils an der hygro-kopischen Wirkung, und es könnte auch ein Gleiten des Haares auf der Welle stattfinden; man pflegt darum meistens ie Enden des Haares in Klemmen, wie sie Fig. 2817 in atürlicher Größe zeigt, zu fassen, und von diesen Seiden-den an den unteren Nagel und die Welle zu führen. Will an das Gleiten auf der Welle verhüten, so gibt man ihr, ie in Fig. 2815, einen doppelten Einschnitt, so daß der Grund noch den oben angegebenen Umfang hat, und führt inen besonderen Faden zur Feder. Die Enden der Fäden ssen sich leicht auf der Rolle befestigen, wenn dieselbe benso wie der untere Nagel durchbohrt ist. Es hat dieses och den Vorteil, daß man, wenn neues Haar eingezogen wird, die Länge desselben so lange ändern kann, bis es wieder den festen Punkten entspricht.

Fig. 2814. Fig. 2815.

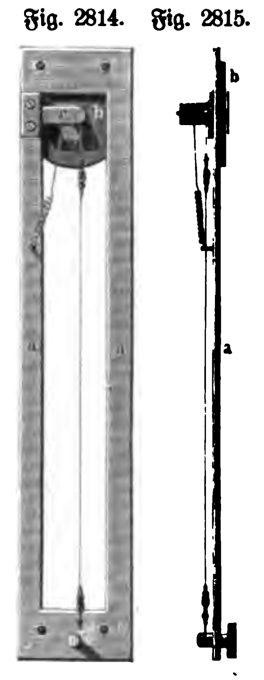
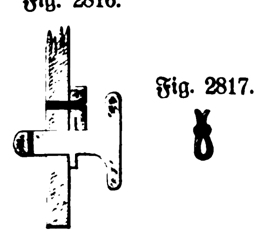


Fig. 2816.

Fig. 2817.



Man hat sich viele Mühe gegeben, die Anzeigen dieser Instrumente vergleichbar u machen und selbst Mikrometerschrauben u. dergl. daran angebracht; wenn man ber bedenkt, daß sie alle ihre hygroskopische Eigenschaft allmählich verlieren, und lbst Haarhygrometer, welche in den festen Punkten übereinstimmen, dennoch in en zwischenliegenden Teilen der Skala voneinander abweichen, so erscheint es über-üssig, an weitere Vervollkommnungen zu denken. Jedenfalls werden beim wirk-chen Gebrauche die oben erwähnten Glasschieber geöffnet. Stimmen bei der von eit zu Zeit erforderlichen Untersuchung die festen Punkte nicht mehr, so müssen ie Beobachtungen korrigiert, und wenn die Differenz zu groß wird, die hygro-kopische Substanz gewechselt werden. Die Anzeigen der Haarhygrometer sollen ber auch direkt von der Temperatur abhängen, so daß sich der Stand des Zeigers ändert, ohne daß sich der Feuchtigkeitszustand geändert hat. (Fig. 2818 b, 44.)

Am meisten verbreitet sind wohl die Haarhygrometer nach Koppe, zu beziehen von Th. Usteri-Reinacher (Nachfolger von Hottinger u. Co.), Zürich, Trittligasse Nr. 34 bis 36; Preis 45 Frcs., und die Haarhygrometer von Hermann u. Pfister in Bern, 24 Frcs., mit Thermometer 28 Frcs. (Fig. 2819 Lb, 30.)

Ein verbessertes Haarhygrometer, bei welchem statt eines Haares ein ganzes Bündel solcher Verwendung findet, mit dem Namen Polymeter bezeichnet, wird von W. Lambrecht, Fabrik meteorologischer Instrumente in Göttingen, konstruiert. (Fig. 2820 Lb, 20.) Ich gebe nachfolgend einen Auszug der Patentbeschreibung.

„Die Ausdehnungen des in allen Lagen gerade gespannten präparierten Haarstranges werden mittels eines Krummzapfens auf einen Zeiger übertragen. Der Krummzapfen ist justierbar, indem die Befestigungsstelle des Haarstranges in einem

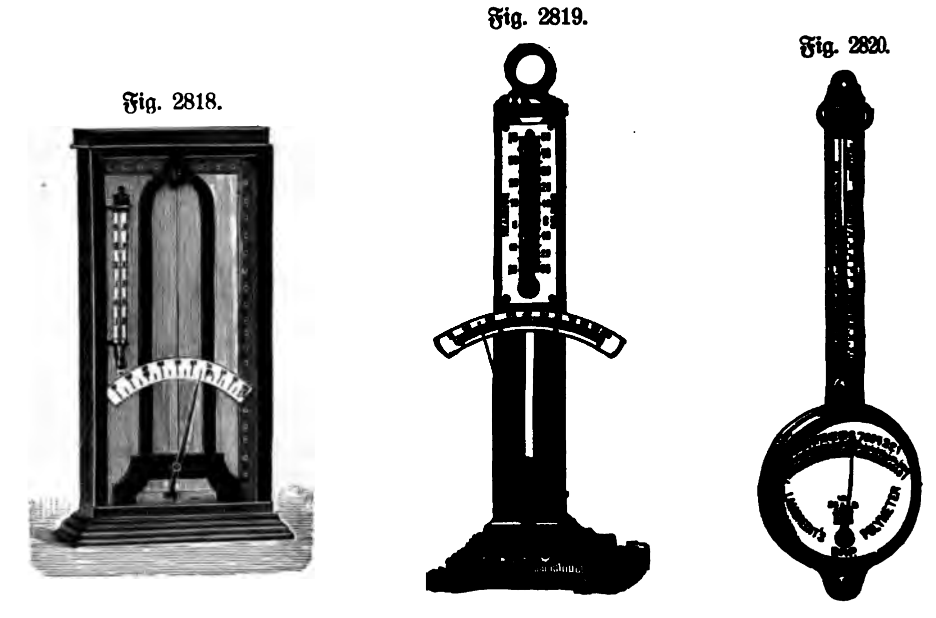


Fig. 2818. Fig. 2819. Fig. 2820.

beweglichen Schlitten angebracht ist und in demselben mittels zweier Schrauben in genau meßbarer Weise von der Zeigerachse entfernt oder derselben genähert werden kann, um die Ausgiebigkeit der Bewegung zu verringern oder zu vergrößern.

Die Belastung des Krummzapfens ist sehr gering, um erstens die sehr geringe Kraft des Haares möglichst vollständig für die Steuerung des Zeigers auszubeuten, um zweitens die mechanische Zerrung des Haares zu vermeiden und endlich die Empfindlichkeit desselben aufs höchste zu steigern.

Die Metallklemmen, in die das Haar an beiden Enden eingeklemmt ist, bewegen sich frei um ihre eigenen Achsen („Haarachsen“), so daß bei jeder Bewegung des Krummzapfens jedes einzelne Haarteilchen beständig in derselben Lagerung bleibt. Indem so der hornartigen Beschaffenheit des Haares Rechnung getragen, jede Krümmung und Knickung des Haares vermieden ist, werden federnde elastische Eigenbewegungen desselben und damit eine wichtige Fehlerquelle aufgehoben. Ebenso kann, da das Haar nirgends anliegt, dessen Verdickung oder Verdünnung durch Feuchtigkeit bzw. Trockenheit keine Wirkung auf den Zeiger ausüben. Endlich ist durch diese Befreiung des Haares, sowie durch die geringe Belastung jeder Indexfehler ausgeschlossen.“

Wenn das Haar anhaltend großer Trockenheit ausgesetzt ist, so verlängert es sich, und wenn es darauf rasch völliger Durchfeuchtung unterzogen ist, so verkürzt es sich vorübergehend über Gebühr. Um diesen Fehler zu kompensieren, vertauscht Lambrecht einen experimentell ermittelten Teil der Haarlänge durch einen in geeigneter Weise behandelten Seidenfaden, der die umgekehrten Eigenschaften hat.

„Über der gleichteiligen, als hinreichend exakt bewährten Prozentskala befindet sich eine zweite ungleichmäßige Teilung. Dieselbe enthält die Differenzzahlen, die, von der Lufttemperatur abgezogen, den Taupunkt genau angeben, wenn die Lufttemperatur 10° C. ist, annähernd genau bei anderen Temperaturen, demnach für das gewöhnliche praktische Bedürfnis, sowohl das meteorologische als das hygienische, andere Hilfsmittel entbehrlich machen.

Größere Genauigkeit wird für alle Temperaturen erreicht bei Benutzung eines kleinen Querbalkens, den die Zeigerspitze zwischen beiden Teilungen trägt und der nach einer einfachen Regel seitliche Visierungen ermöglicht.

Mit dem Instrument ist ein Thermometer von Jenaer Hartglas verbunden, welches in seiner Empfindlichkeit derjenigen des Haares genau angepaßt ist und neben der gewöhnlichen Temperaturskala eine andere trägt, an der die Dunstdruckmaxima in Millimetern abzulesen sind.

Mittels Kombinierung dieser Skala und der Prozentskala des Hygrometers läßt sich also der jeweilige Dunstdruck nach der Formel $e' = \frac{ep}{100}$, und damit annähernd auch das Gewicht des jeweiligen Wasserdampfes pro Kubikmeter, ferner das Flüggesche Sättigungsdefizit nach der Formel $d = \frac{e(100-p)}{100}$ sofort finden; endlich ergibt die Vergleichung des gefundenen Dunstdruckes mit der gegenüberstehenden Temperatur den absolut genauen Taupunkt.“

Nach Fleischer sind die in einem Wohnzimmer zulässigen äußersten Grenzen der relativen Feuchtigkeit 40 und 80 Proz.

Sehr verbreitet sind auch die Metallspiralhygroskope. W. Holtz (1885) bestreicht einen spiralig um einen Stift gewickelten Messingstreifen von 150 cm Länge, 2 mm Breite und 0,04 mm Stärke auf der Außenseite mit Gelatine und hängt ihn in gleicher Weise auf, wie ein Breguetsches Metallthermometer. Die Empfindlichkeit ist sehr groß, doch ist das Instrument nicht nur gegen Feuchtigkeitsänderungen, sondern auch gegen Temperaturänderungen empfindlich, da es zugleich als Metallthermometer wirkt. Gleiches gilt von den ähnlich konstruierten Mitthoffschen Metallspiralhygroskopen, die von dem Mechaniker Voß in Berlin NO., Pallisadenstr. 20, in den Handel gebracht werden [1]). (Fig. 2821 K, 8.)

Fig. 2821.

[1]) Siehe auch Rebenstorff, Z. 17, 28, 1904.

337. Gaspenetration durch Membranen. Über einen Glastrichter von 8 bi 10 cm Durchmesser spannt man luftdicht eine dünne Kautschukmembran, etwa durc Abschneiden des der Öffnung nahen Teiles eines Kautschukballons erhalten, wie solch zu Spielzeugen Verwendung finden. Man verbindet den Trichter mit einem Queck silbermanometer und stellt ihn, an einem Stativ befestigt, so auf, daß er mit de Membran nach unten in ein Glasgefäß (umgekehrte Glasglocke) hineinragt. A dem Manometer wird ein elektrischer Kontakt angebracht, so daß, sobald das Queck silber im äußeren Schenkel auch nur um sehr wenig steigt, ein elektrischer Stro geschlossen wird, der ein Läutewerk in Tätigkeit setzt. Leitet man nun einen an fangs raschen, später langsamen Strom von Kohlensäure in die Glocke ein, so wir nach etwa 5 bis 10 Minuten das Läutewerk von selbst in Gang kommen.

Füllt man den Trichter mit Kohlensäure und stellt die Spitze in Wasser, s sieht man das Wasser allmählich aufsteigen, die spezifisch schwerere Kohlensäur diffundiert also durch Kautschuk schneller als die spezifisch leichtere Luft, währen bei Diffusion durch poröse Platten das umgekehrte der Fall ist.

338. Verwitterung kristallwasserhaltiger Salze. Sehr gut hierzu geeignet sin die großen Kristalle von Soda und Kupfervitriol, wie man sie im Handel erhält. Läß man sie längere Zeit an freier Luft liegen, so tritt Zersetzung ein, indem ein Te des Wassers sich verflüchtigt und als gasförmiger Wasserdampf der Luft beimeng Man kann den Prozeß wesentlich beschleunigen, wie es für einen Vorlesungsversu nötig ist, dadurch, daß man dieselben in einen der früher beschriebenen Exsiccatore bringt oder in irgend ein Gefäß, welches etwas konzentrierte Schwefelsäure, Chlor calcium, wasserfreie Phosphorsäure enthält und durch diese Substanzen trocken e halten wird. Man bringt in dem Gefäß ein kleines Dreifüßchen aus Draht ode Glasstäbchen an, legt darauf ein grobmaschiges Drahtnetz und darauf die Kristall Das Gefäß ist mit einem abgeschliffenen Rande versehen und wird nach Einsetzun desselben mit einer eben geschliffenen Glasplatte bedeckt.

339. Verdunstung fester Körper. Als Beispiel mag Dreifachchlorkohlensto (C_2Cl_6) dienen, oder kristallisiertes Jod oder Campher. Alle diese Körper werde an freier Luft allmählich immer kleiner, indem sie sich in die gasförmige Modifi kation umsetzen und diese sich in der Luft durch Diffusion verbreitet, wie au schon der Geruch lehrt. Zur Demonstration dient das Projektionsmikroskop.

Als Beispiel sehr weitgehender Teilbarkeit wird gewöhnlich Moschus erwähn bei dem der Geruch die Bildung und das Vorhandensein der geringsten Damp mengen verrät.

Siebentes Kapitel.

Temperatur.

340. Begriff der Wärme. Von der Existenz der Wärme erhalten wir zunäch Kenntnis durch das Gefühl. Halten wir die Hand über eine Flamme, so sche ein feines Fluidum in dieselbe einzudringen, ähnlich wie z. B. Wasser in ei

gallertartige Masse hineindiffundieren kann. Wir gelangen so zur Stofftheorie der Wärme, die namentlich auch dadurch gestützt zu werden scheint, daß eine Art Aufquellen des Körpers beim Eindringen der Wärme stattfindet, welches beim Entziehen der Wärme, beim Abkühlen wieder rückgängig wird. Am auffälligsten zeigt sich dieses Aufquellen bei Gasen, deren Moleküle nach dem oben Gesagten nicht durch eine Kohäsionskraft zusammengehalten werden.

Fig. 2822.



Fig. 2823.

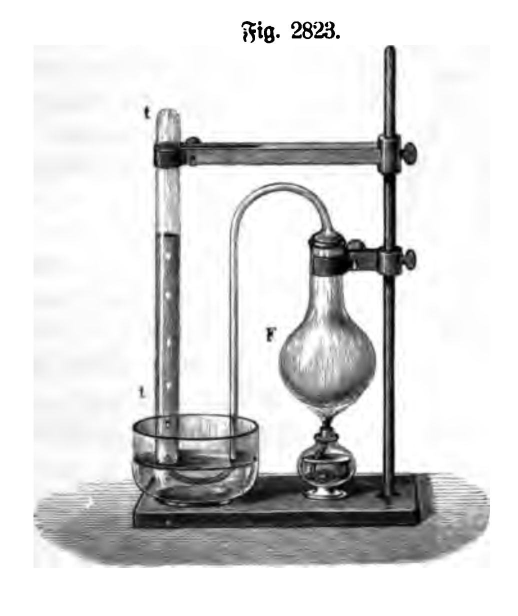
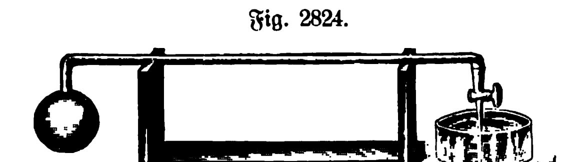


Fig. 2825.



Fig. 2824.



341. **Ausdehnung gasförmiger Körper.** Die Ausdehnung der Luft zeigt man am einfachsten mittels eines großen Glaskolbens, welcher mit der Öffnung in Wasser eintaucht. Erhitzt man ihn durch Bestreichen mittels der Flamme eines großen Bunsenbrenners, so entweichen Luftblasen, beim Abkühlen dringt Wasser ein (Fig. 2822).

Fig. 2823 zeigt einen zu gleichem Zwecke dienenden komplizierteren Apparat (Lb, 12), Fig. 2824 (Lb, 12), einen Apparat zur Demonstration der Kraft der scheinbaren Quellung, d. h. der Druckzunahme bei konstantem Volumen. Man kann bei geschlossenem Hahn erhitzen und das Austreten von Blasen nach dem Öffnen zeigen.

Galileis Thermoskop[1]). Man verwendet hierfür, vorausgesetzt, daß die Schülerzahl nur klein ist, ein mit Luft gefülltes Thermometer, in welches man nur

[1]) Bezüglich der Geschichte des Thermometers siehe Z. 16, 304, 1903.

als Index eine kleine Quecksilbersäule bringt, die sich nach Erwärmen und Wiedererkalten des Gefäßes leicht von selbst hineinzieht, wenn man das Ende des Rohres in Quecksilber taucht. Für eine größere Zuhörerzahl wird man ein besonderes Thermometer mit sehr großem Gefäß und langem, starkwandigem Rohr (event. mit flacher Höhlung) herstellen müssen, falls man nicht Projektion vorzieht. An der der Einmündungsstelle gegenüberliegenden Stelle des kugelförmigen Glasgefäßes befindet sich ein kleiner Glashahn, um vermittelst eines angesetzten engen Gummischlauches den Index einsaugen zu können. Ist dies geschehen, so läßt man den Hahn noch einige Zeit offen, bis man sicher sein kann, daß Temperaturgleichgewicht mit der Umgebung eingetreten ist, und schließt ihn dann. Es genügt, die warme Hand mit dem Gefäße in Berührung zu bringen, um eine weithin sichtbare Verschiebung des Index zu erhalten, welche wieder rückgängig wird, wenn man die Hand entfernt. Die ursprüngliche Form von Galileis Instrument zeigt Fig. 2825.

Fig. 2826.

Kirchers Thermoskop gleicht einem großen gewöhnlichen Thermometer, doch ist die Kugel nur teilweise mit Flüssigkeit gefüllt und die Röhre setzt sich bis zum tiefsten Punkte in die Kugel hinein fort. Die Ausdehnung der Luft in der Kugel treibt beim Erwärmen die Flüssigkeit in der Röhre in die Höhe. (Vgl. Fig. 2851, S. 1053.)


Fig. 2827.


Fig. 2828.

Guerickes Wasserbarometer[1]), ein Instrument, welches auch heute noch zuweilen sich findet und als untrüglicher Wetterprophet gilt, besteht aus einer U-förmigen, mit Wasser gefüllten Röhre, deren einer Schenkel oben geschlossen und zu einer Kugel aufgeblasen ist. An der Kugel wird zweckmäßig ein Hahn angebracht. Vor dem Versuch würde man durch Öffnen des Hahnes die beiden Wasserniveaus in gleiche Höhe bringen und dann den Hahn wieder schließen. Das Wasser wird durch schwefelsaures Kupferoxydammoniak (erhalten durch Zusatz von Salmiakgeist zu Kupfervitriollösung), Ketonblau[2]), Indigolösung, übermangansaures Kali,

[1]) Müller-Uri in Braunschweig liefert Wasserbarometer nach Fig. 2826 zu 2,50 Mk. — [2]) Siehe Seite 814 unten.

Kalibichromat oder dergleichen gefärbt. Guericke selbst brachte, ähnlich wie beim Radbarometer, einen Schwimmer mit über eine Rolle geführtem und am Ende durch ein Gewichtchen (kleines Männchen) gespannten Faden an, da sein Gefäß aus Metall gefertigt war, so daß man den Stand der Flüssigkeit nicht direkt beobachten konnte. (Eine andere Form ist Fig. 2747, S. 994, Hahn *a* geöffnet.)

Barometer-Luftthermoskop. Bei diesem ist das Luftgefäß mit dem offenen Schenkel eines Heberbarometers in Verbindung gebracht, so daß die Veränderungen des äußeren Luftdruckes das Instrument nicht beeinflussen können.

G. Karstens Aneroidthermoskop. Das Wassermanometer ist durch ein empfindliches Federmanometer ersetzt. L. Steger in Kiel (am Wall) liefert ein solches Instrument zu 50 Mk. Die Figuren 2827 (E, 50) und 2828 (K, 50) zeigen zwei verschiedene Ausführungsformen. Ich selbst benutze ein auf 2 m hohem Stativ angebrachtes Instrument, bei welchem der Schlauch ersetzt ist durch eine dünne Messingkapillare von etwa 2 mm äußerem Durchmesser und 3 m Länge. Die Kugel ist eine hohle Messingkugel, welche die Temperatur rasch annimmt.

Registrierthermometer zur selbsttätigen Aufzeichnung der Temperatur auf eine durch Uhrwerk angetriebene Trommel liefert M. Kohl zu 210 Mk.

342. Montgolfieren kann man im kleinen herstellen und zum Steigen bringen; sie müssen aber aus sehr feinem Papier verfertigt werden und mindestens $1^1/_2$ bis 2 dm Durchmesser haben. Unterhalb erhalten sie dann einen 8 bis 10 cm weiten Ring von dünnem Draht. Um sie steigen zu lassen, hält man sie an einem in die Spitze eingeklebten Faden mit einer Hand und breitet sie mit der anderen nach allen Richtungen gut aus; das Erwärmen geschieht durch ein zusammengedrehtes, in Weingeist getauchtes Stück Fließpapier, dessen Flamme man rasch tief in den Ballon hineinführt und ebenso rasch wieder entfernt [1]).

Größere Montgolfieren, die man im Freien steigen lassen kann, sind in Spielwarenhandlungen zu haben.

343. Demonstrationsthermometer. Zu direkten Demonstrationen dient am einfachsten ein Guerickesches Wasserbarometer, dessen Gefäß man durch einen langen engen Kautschukschlauch mit dem Manometer verbindet. Die Skala für den wirklichen Gebrauch bestimmt man empirisch durch Vergleich mit einem Quecksilberthermometer. Zunächst stellt man sie aber her, indem man den Zwischenraum zwischen beiden Fixpunkten in 100 gleiche Teile teilt.

344. Bestimmung der festen Punkte. Der Nullpunkt wird bestimmt, indem man die Thermoskopkugel in ein Gemenge aus fein gestoßenem Eis oder besser aus Schnee und wenig Wasser einsenkt, wie Fig. 2829 (Lb, 18) und 2830 (K, 10) für ein Quecksilberthermometer andeutet [2]).

Fig. 2831 zeigt ein Instrument zum Zerkleinern des Eises. Eine Ahle oder große Nadel mit Glasknopf ist übrigens hierzu ebenfalls verwendbar.

---

[1]) Im Karlsruher Institut befindet sich ein Papierglobus von etwa 2 m Durchmesser, der nach diesem Prinzip etwa durch die mittels eines Blechrohrs zugeleiteten heißen Verbrennungsgase eines Bunsenbrenners aufgebläht werden kann. — [2]) Eisgefäße mit doppelten Wänden liefert R. Fueß in Steglitz bei Berlin zu 10 bis 15 Mk.

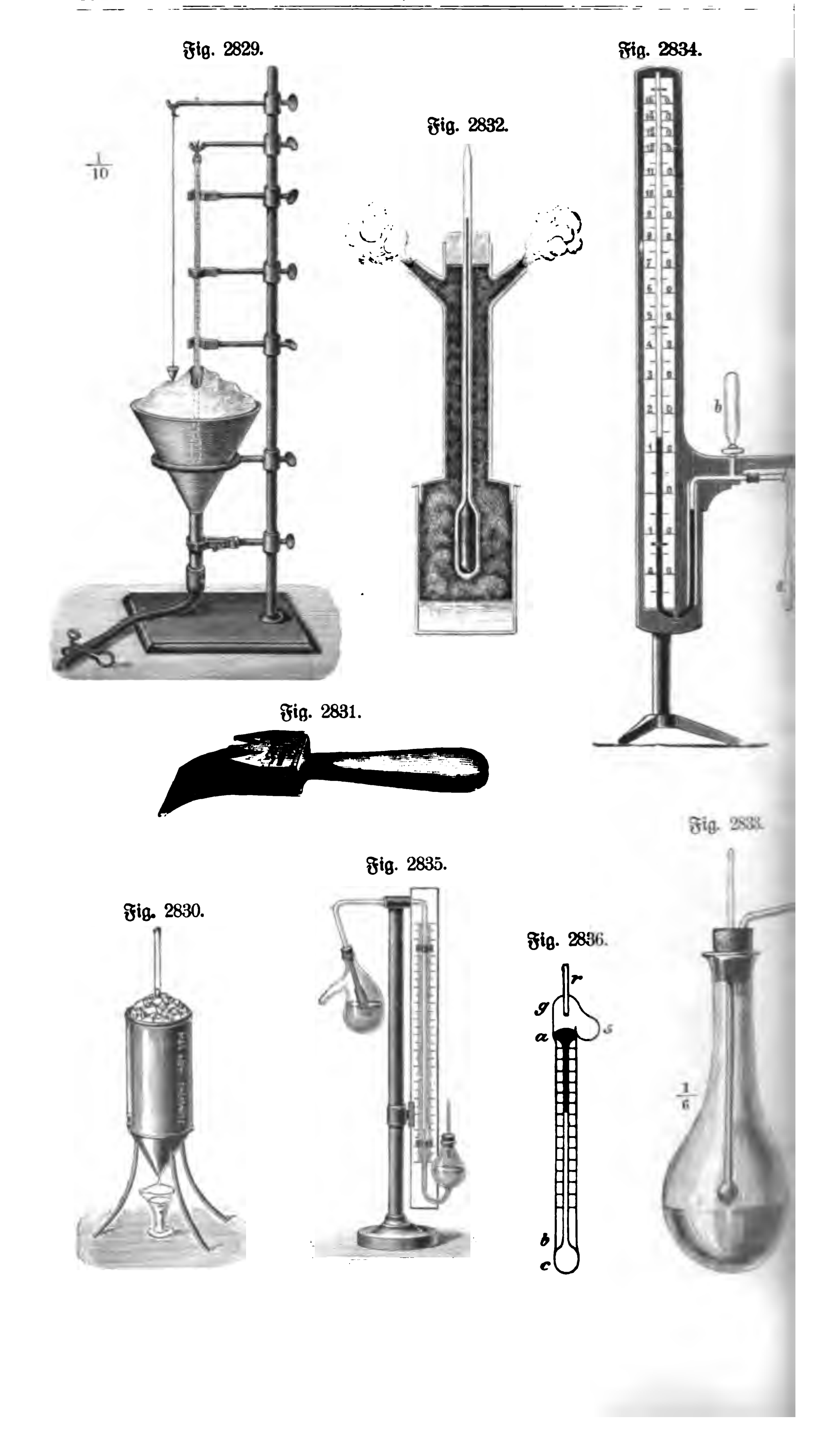


Fig. 2829.

Fig. 2832.

Fig. 2834.

Fig. 2831.

Fig. 2833.

Fig. 2835.

Fig. 2830.

Fig. 2836.

Der Siedepunkt wird in einem metallenen Gefäße, wie Fig. 2832, bestimmt, dessen langer Hals für das Entweichen des Dampfes zwei Seitenöffnungen, dessen mittlerer Teil aber eine Öffnung hat, welche eben so weit ist, daß jede Thermometerröhre mit einem umgebundenen Faden ohne Anstoß durchgeschoben werden kann. Diese Öffnung befindet sich am besten in einem Deckel, der an das Thermometer geschoben wird und erst mit diesem auf das Gefäß kommt, wenn das Wasser bereits einige Zeit gesotten hat; das Thermometer muß dabei nahe an das siedende Wasser reichen. Ein solches Gefäß wird unterhalb aus einem Stück von Kupfer oder Messing gemacht und mittels seines vorstehenden Randes auf den Ring eines Gestelles gesetzt. Zweckmäßig tritt der Dampf zunächst in einen den Hals des Gefäßes umgebenden Dampfmantel und strömt erst unten aus diesem ins Freie.

Man kann übrigens auch einen weithalsigen Glaskolben benutzen, wenn man einen spiralig gewundenen Draht in das darin befindliche Wasser bringt und in die Öffnung einen Kork einsetzt, der außer einer Öffnung für das Thermometer noch eine für eine gebogene Glasröhre hat, durch welche der Dampf abgeleitet wird, Fig. 2833. Hierbei setzt man aber das Glas nicht unmittelbar über die Flamme, sondern auf ein Stück Drahttuch, um dem Zerspringen vorzubeugen.

Am bequemsten ist die Benutzung der Dampfleitung (vergl. S. 36), auf deren Standrohr man ein Gefäß wie Fig. 2832 aufschraubt.

Borgesius (Z. 13, 26, 1900) bringt zur Regulierung des Luftthermometers das aus Fig. 2834 ersichtliche Gefäß *b* an, aus welchem bei zu hohem Barometerstande durch Erwärmen etwas Luft nach *a* getrieben wird, während bei zu niedrigem durch Lüften des Zapfens Luft herausgelassen wird, bis die Angabe mit der eines auf der Rückseite befestigten Quecksilberthermometers übereinstimmt.

Fr. C. G. Müller (Z. 1, 102, 1888; 3, 214, 1890) erreicht den gleichen Zweck einfacher durch Verschieben der Skala.

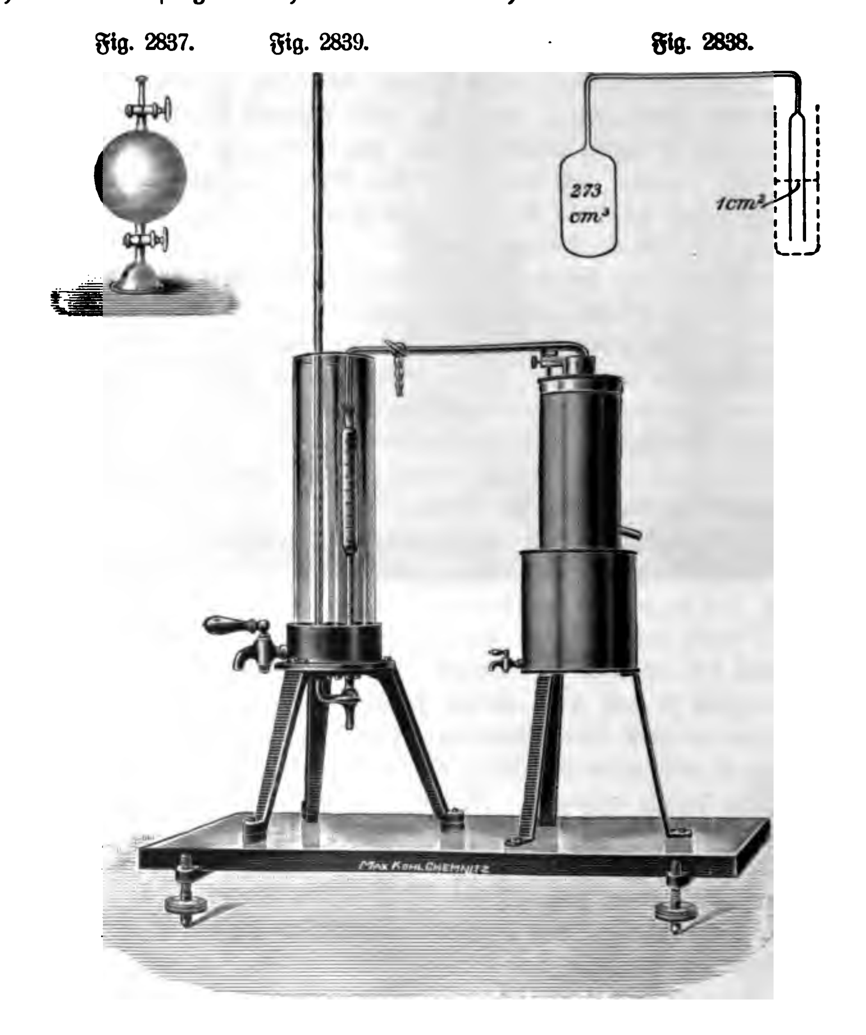
Speziell für chemische Zwecke für Temperaturen zwischen 350 und 500°, für welche das Quecksilberthermometer nicht mehr ausreicht, hat Alvergniat das in Fig. 2835 (K, 60) dargestellte Luftthermometer konstruiert. Das eigentliche Thermometergefäß ist durch eine S-förmige Glasröhre verbunden mit einem weiten tieferen Gefäße, welches sich etwa dem Gefäße eines Birnbarometers vergleichen läßt. Jedenfalls muß dasselbe so groß sein, daß ein Steigen oder Fallen des Quecksilbers in der Röhre keine merkliche Niveauänderung des Quecksilbers in dem Gefäße erzeugt. An der Röhre ist eine empirische Skala angebracht, die dadurch erhalten wird, daß man einige feste Punkte derselben, z. B. den Schmelzpunkt des Eises 0°, den Siedepunkt des Wassers 100°, den des Quecksilbers 350° und den des Schwefels 440° bei ein und demselben Barometerstande bestimmt und danach die übrigen Teilpunkte der Skala aufsucht. Beim Gebrauch des Instrumentes ermittelt man jeweils zunächst wieder den Siedepunkt des Wassers und verschiebt die Skala, so daß der betreffende Punkt derselben mit dem Stande des Quecksilbers übereinstimmt. Um wieviel die Skala verschoben werden muß, richtet sich nach dem jeweiligen Barometerstande. (S, 60.)

Rebenstorff (Z. 15, 19, 1902) empfiehlt als sehr empfindliches Luftthermoskop das in Fig. 2836 dargestellte, von Gust. Müller in Ilmenau zu beziehende Barothermoskop. Die in *c* eingeschlossene Luftmasse steht unter dem Drucke der schwarz angedeuteten Quecksilbersäule, auf welche durch das Röhrchen *r* der Druck der äußeren Atmosphäre wirkt. Eine Kontraktion der Luft wird dadurch

noch verstärkt, daß gleichzeitig auch die drückende Quecksilbersäule sich verlängert. Das Instrument kann für die verschiedensten Temperaturen gebraucht werden. Man schleudert zunächst das Quecksilber in die Ausbauchung *s*, wartet bis die Temperatur sich ausgeglichen hat und bringt nun erst das Quecksilber durch Schütteln nach *a*. Um die Quecksilbersäule auf größere Entfernung sichtbar zu machen, läßt man von vorn schräg das Licht einer nach den Zuschauern hin abgeblendeten, gleich hochstehenden, recht hellen Lampe auffallen.

Uhlich (Z. **10**, 203, 1897) hält weithin sichtbare Skalen für unnötig und für ausreichend, wenn ein oder zur Kontrolle zwei Schüler unter Oberaufsicht des Lehrers die Ablesung des Thermometers übernehmen.

Fig. 2837. Fig. 2839. Fig. 2838.



345. **Ausdehnungskoeffizient.** Zur Bestimmung desselben verwendet man am einfachsten einen großen vollkommen trockenen Glasballon, dessen Hals sich durch einen Kautschukpfropfen mit Hahn verschließen läßt. Man erhitzt ihn in einem Dampfbade bei geöffnetem Hahn, bis keine Luft mehr aus diesem austritt, schließt dann den Hahn, läßt abkühlen und öffnet wieder unter Wasser, wobei dann durch den Luft-

eine der ausgetretenen Luftmenge entsprechende Wassermenge eintritt, falls dafür sorgt, daß das Wasserniveau innerhalb und außerhalb des Ballons lbe ist. Zu gleichem Zwecke kann die Kugel Fig. 2837 (E, 12) dienen. Wer- t man auf Genauigkeit, so kann man auch das beim Erhitzen des Ballons etende Gas in einem kleinen geeichten Glockengasometer aus Glas auffangen hier abmessen. Bei einem Kolben von 7 Liter Inhalt beträgt die austretende

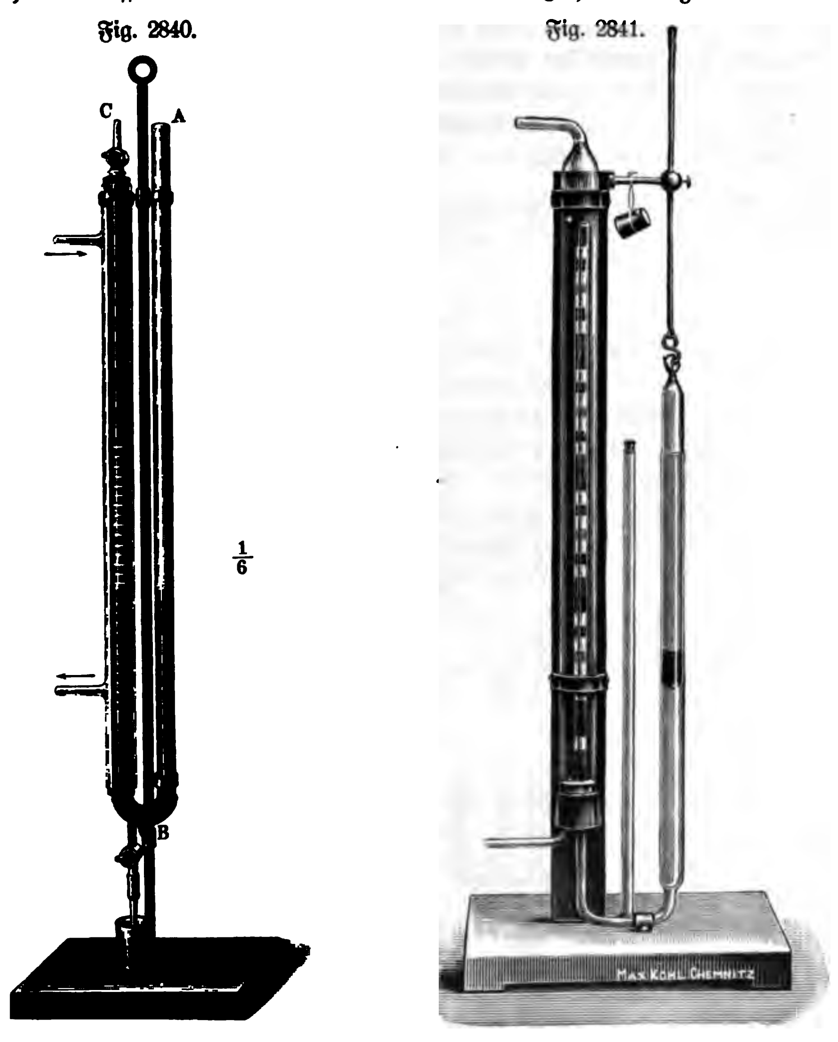


Fig. 2840. Fig. 2841.

ge gegen 2 Liter, falls die Temperatur von 20° auf 100° erhöht wird, ist somit hin sichtbar, doch müßte, wenn die Messung genau werden sollte, dieselbe bei gewöhnlicher Temperatur, sondern ebenfalls bei 100° erfolgen, was sich dieser einfachen Vorrichtung nicht bewerkstelligen läßt.

K. Fuchs (Z. 8, 368, 1895) verwendet einen Kolben von 273 ccm Inhalt, der, wie Fig. 2838 zeigt, durch eine Kapillare mit einer in Centimeter geteilten rröhre von 1 qcm Querschnitt in Verbindung steht.

Das Meßrohr wird in ein Cylinderglas mit Wasser eingesenkt, so daß das au außen und innen gleich ist.

Erwärmt man den Ballon und Cylinderglas z. B. um 20°, so muß das Meßrohr 20 cm herausgezogen werden, damit wieder Niveaugleichheit besteht.

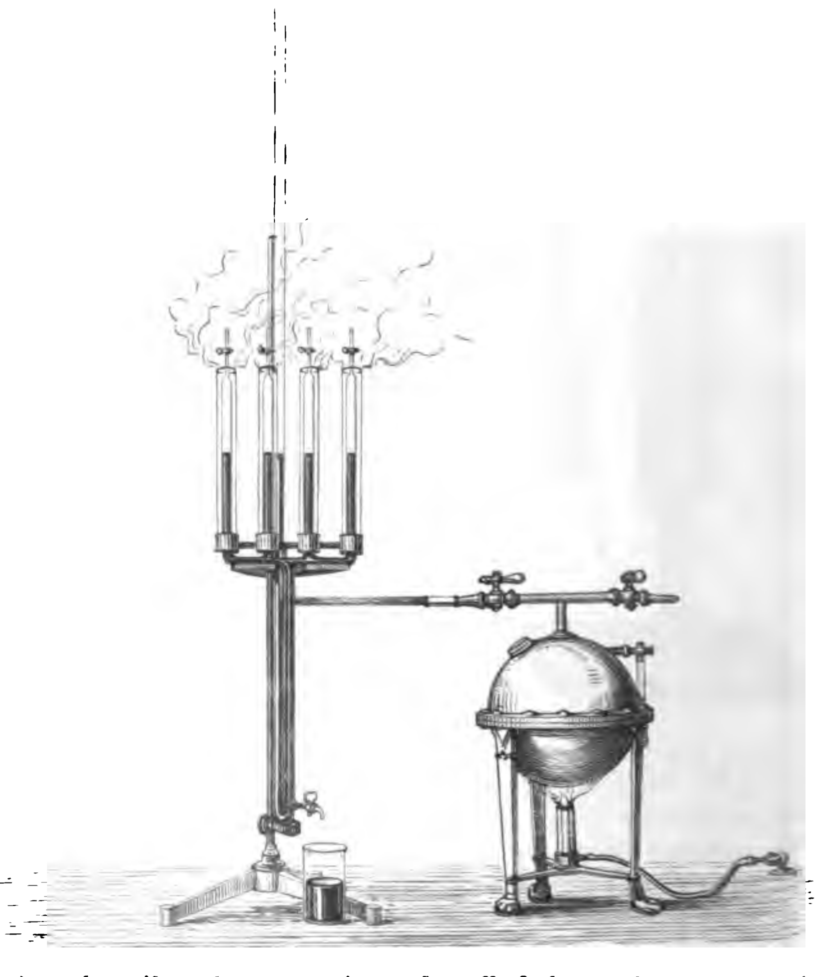
Zu genauen Versuchen dient der Regnaultsche Apparat 2839 (K, 165).

Zu Demonstrationszwecken werden ferner die in den Fig. 2840 (Lb, 27) und 284[illegible] (K, 33) dargestellten Apparate benutzt, bei welchen indes streng genommen auch die Ausdehnung des Quecksilbers in dem erhitzten Schenkel berücksichtigt werden müßte. Bei dem ersten bringt man die Quecksilberoberflächen auf gleiches Niveau durch Ablassen von Quecksilber mittels des Hahnes, beim anderen durch Verschieben des Senkkörpers in dem offenen Schenkel rechts.

Zakrzewski bedient sich derselben Vorrichtung wie zum Nachweis des Boyleschen Gesetzes (S. 993).

346. Ausdehnung verschiedenartiger Gase. Um die Gleichheit der Ausdehnung für gleiche Erwärmung bei verschiedenartigen Gasen (Gesetz von Charles-Gay-

Fig. 2842.



Lussac) nachzuweisen, kann man den ersten Versuch von § 345 mit gleichen Ballons wiederholen, welche man mit Leuchtgas, bzw. Kohlensäure gefüllt hat.

Einfacher kann zu diesem Zwecke eine Serie von Guerickeschen Wasserbarometern dienen, deren Gefäße man mit verschiedenen Gasen gefüllt hat und die man dann, nachdem sie die Temperatur der Umgebung angenommen und die Niveaus durch Regulierung des Gasdruckes in den die Gase enthaltenden Glockengasometern gleich geworden sind, nach Absperrung der Hähne alle zugleich in eine große, mit warmem Wasser gefüllte Glaswanne einbringt. Das Wasser wird gut umgerührt. Waren die Gefäße, wie vorausgesetzt wird, gleich groß und die Röhren gleich weit, so werden auch die Niveauunterschiede dieselben sein. Ganz vollkommen wird dies allerdings nicht zu erreichen sein, indes ist für Demonstrationszwecke auch annähernde Gleichheit völlig genügend, da es ja nur darauf ankommt, eine klare Vorstellung darüber zu erzeugen, daß die Gase sich um gleichviel ausdehnen, und dieses Gesetz dem Gedächtnis gut einzuprägen.

Zuweilen werden auch Apparate in Form Fig. 2842 gebraucht, deren Schenkel sich durch Dampfmäntel heizen lassen (nach Hofmann), doch zerspringen die Hähne leicht oder werden in der Wärme undicht[1]).

Ferner kann man isolierte, gleich große Glaskugeln mit Hahn benutzen (Fig. 2837), welche man beim Erkalten Wasser oder Quecksilber einsaugen läßt. Die eingesaugte Flüssigkeitsmenge ergibt sich unabhängig von der Natur des Gases.

Zur Veranschaulichung des Mariotteschen und des Gay-Lussacschen Gesetzes empfiehlt sich die Darstellung der sogenannten Temperaturfläche (vergl. Ritter, Wied. Ann. 3, 447 u. 614, 1878) durch ein Draht- oder Gipsmodell[2]).

Hier wären eventuell zu besprechen: absoluter Nullpunkt und absolute Temperatur, das kombinierte Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz, die Reduktion eines Gasvolumens auf 0° und 760 mm, das spezifische Gewicht der Gase bei verschiedenen Temperaturen. (Vgl. § 350, S. 1052.)

347. Verdrängungsverfahren. V. Meyers Apparat. Derselbe gestattet genaue Versuche auszuführen und dieselben namentlich auch bis zu sehr hohen Temperaturen (V. Meyer ging bis zu 2000°) fortzusetzen. Das eine Gas befindet sich in einem Porzellangefäß, welches in zwei diametral entgegengesetzte Kapillaren aus Porzellan ausläuft. Letztere werden mit zwei Gefäßen verbunden, von denen das eine Gas in sich birgt, dessen Menge ebenfalls gerade ausreichend ist, das Gefäß zu erfüllen, das zweite dagegen leer, aber geeignet ist, das erste Gas aufzunehmen, wenn dieses durch das zweite aus dem Gefäße verdrängt wird. Um letzteres zu bewerkstelligen, könnten die beiden Gasbehälter unten durch Kautschukschläuche mit beweglichen Quecksilberreservoiren (wie bei den Quecksilberluftpumpen) versehen sein. Außerdem müßten die Kapillaren des Porzellangefäßes, welche dasselbe mit den beiden Behältern verbinden, durch Dreiweghähne verschließbar sein, welche gestatten, wenn nötig, Kommunikation mit der Atmosphäre bzw. dem das zweite Glas enthaltenden Glockengasometer herzustellen, in welchem das Gas ohne Pressung, d. h. mit Atmosphärendruck, enthalten sein muß. Man würde zunächst den einen Gasbehälter sich durch Heben des Quecksilbergefäßes und Herstellung der Verbindung mit der Atmosphäre sich mit Quecksilber füllen lassen, darauf die Verbindung mit dem (mit Luft von gewöhnlicher Dichte gefüllten) Porzellangefäß herstellen; dann ebenso mit dem

---

[1]) Man kann auch zeigen, daß bei konstantem Volumen der Druck pro Grad um $^1/_{273}$ zunimmt. — [2]) Derartige Modelle liefert die Werkstätte von Schilling in Darmstadt; eine Fläche aus Malerleinwand zum Aufzeichnen von Diagrammen F. Hajek in Prag.

anderen Gasbehälter verfahren, diesen nun durch Herstellung der Verbindung mit dem Gasometer und Senken des Quecksilberreservoirs mit dem zweiten Gase füllen, wobei darauf zu achten ist, daß das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch steht, nun die Verbindung mit dem Porzellangefäß herstellen und durch Heben des einen und Senken des anderen Quecksilberreservoirs bewirken, daß nun das zweite Gas das erste aus dem Porzellangefäß verdrängt, welches seinerseits dann in den mit Quecksilber gefüllten Gasbehälter einströmt. Wie hoch man auch das Porzellangefäß erhitzen mag, stets wird sich finden, daß das verdrängte und wieder erkaltete erste Gas denselben Raum erfüllt wie das zweite, welches an seine Stelle getreten ist. Würde letzteres sich stärker ausdehnen, so müßte scheinbar mehr von dem ersten Gase, d. h. in Wirklichkeit das erste und ein Teil des zweiten heraustreten; wäre sie kleiner, so würde das Umgekehrte stattfinden.

Ich hatte nicht Gelegenheit, einen solchen Apparat auszuführen und beschränke mich deshalb auf diese Andeutung. (Vgl. auch § 353.)

348. Die Luftthermometer. Die Gleichmäßigkeit der Ausdehnung der Gase, ihre Unabhängigkeit vom Drucke (von der Dichte) und sogar von der chemischen Zusammensetzung gibt die Gewißheit, daß zwei beliebige nach Celsius geeichte Luftthermoskope stets übereinstimmenden Gang haben werden, selbst dann, wenn man die Teilung über den Gefrier- und Siedepunkt hinaus fortsetzt, daß also die Celsiusgrade als wahres Maß der Temperatur betrachtet werden können. Allerdings zeigen sich tatsächlich kleine Abweichungen und die vollkommen richtige Temperaturskala kann erst nach Behandlung des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie besprochen werden.

Die weiteste Verbreitung hat das Jollysche Thermometer (1874) gefunden. Beim Gebrauch desselben muß man besondere Sorgfalt darauf verwenden, daß die Füllung aus völlig trockener Luft besteht. Um die Füllung auszuführen, ist das gläserne Gefäß des Thermometers mit einem kurzen Stück des Rohres abnehmbar, nämlich durch ein Stahlrohrverbindungsstück mit Überwurfmutter mit dem Kautschukschlauch verbunden. Dasselbe Verbindungsstück dient auch dazu, das Gefäß mit einer Quecksilberluftpumpe in Verbindung zu setzen. Man muß etwa 10 bis 12 mal evakuieren und das Gefäß jeweils wieder mit Luft sich füllen lassen, welche zuvor durch wasserfreie Phosphorsäure hindurchgegangen ist. Um auch die an der Wand haftende Feuchtigkeitsschicht zu entfernen, könnte man während des Evakuierens das Gefäß gleichzeitig erwärmen und schließlich elektrische Entladungen darin erregen, indem man einen isolierten Draht in einigen Windungen herumführt und durch diesen mehrmals eine Leidener Flasche entladet. Selbstverständlich muß auch die Pumpe und das darin enthaltene Quecksilber vollkommen trocken sein. Um nach erfolgter Füllung das Gefäß abschließen zu können, ist daran ein Hahn angebracht. Nachdem es wieder mit dem Kautschukschlauch verbunden ist, schiebt man das Gefäß am offenen Schenkel des Kautschukschlauches soweit in die Höhe, bis das Quecksilber durch die axiale Bohrung des Hahnes, Fig. 2843, heraustritt. Nun dreht man den Hahn um 90° und stellt dadurch die Verbindung zwischen Gefäß und Kautschukschlauch her, so daß das Thermometer zur Benutzung bereit ist. (E, 65.)

Fig. 2843.



Der Schlauch muß auch bei den niedrigsten Temperaturen unter innerem Überdruck stehen, damit von außen keine Luft durchdringen kann. Als Gas wird gewöhnlich nicht Luft, sondern Wasserstoff und bei höheren Temperaturen Stickstoff gewählt[1]).

Pfaundler gab dem Jollyschen Luftthermometer die in Fig. 2844 dargestellte Form (E, 100). An zwei vertikalen Säulen sind durch Muffen mit Klemmschrauben einerseits das Gefäß, andererseits das aus Glas gebildete Ende der Röhre verschiebbar, während die eigentliche Röhre, aus überstricktem Kautschukschlauch gebildet, frei herabhängt. In der Mitte zwischen beiden Säulen befindet sich ein Maßstab, an welchem die Niveaudifferenz abgelesen werden kann. Diese Anordnung ist nicht nur übersichtlicher als die übliche, sondern hat auch den wesentlichen Vorzug, daß kein Verwerfen der Säulen eintreten kann, da diese nicht aus Holz bestehen.

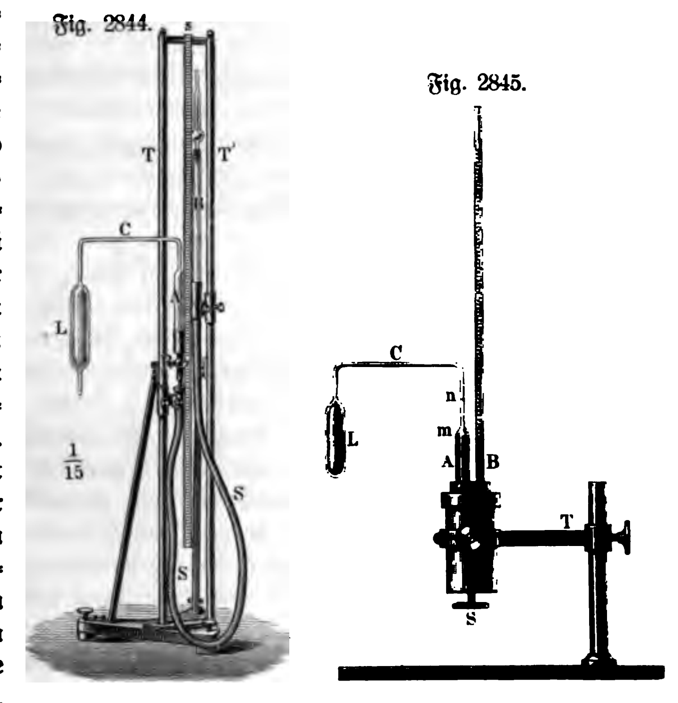


Fig. 2844. Fig. 2845.

Eine andere Ausführungsform, wobei der Stand des Quecksilbers mittels eines durch die Schraube *S* zu bewegenden Kolbens geändert werden kann, zeigt Fig. 2845 (Lb, 65[2]).

Die Gefäße bestehen bei Luftpyrometern bis 500° aus Jenaer Glas 59, bis 1100° aus glasiertem Porzellan oder Quarzglas, darüber hinaus aus Platin oder Platiniridium, wobei aber Kontakt mit Heizgasen absolut zu vermeiden ist.

Bei genaueren Messungen muß auch der schädliche Raum zwischen Kugel und Quecksilberoberfläche in Betracht gezogen werden, sowie die thermische Ausdehnung des Gefäßes.

---

[1]) Noch besser wird voraussichtlich Helium geeignet sein. — [2]) Auf ein Luftthermometer von Petterson (1882), welches von Fr. Müller (Geißlers Nachf.) in Bonn zu beziehen ist und Temperaturen zwischen 250 bis 300° auf 1/100 Grad genau zu bestimmen gestattet, kann hier nur hingewiesen werden (siehe Kolbes J. 25, 102 bis 114). Ein Luftpyrometer mit dosenförmigem Aneroid, Temperaturen von 0 bis 1400° anzeigend, ist zum Preise von 220 Mk. zu beziehen von Franz Müller in Bonn. Das Gefäß besteht aus Porzellan, ist mit Asbest umwickelt und muß zum Schutze mit einem Eisenrohr umgeben und dieses wieder durch eine Lage Schamotte, Quarz und Ton geschützt werden (siehe F. Braun, Elektrotechn. Zeitschr. 1888, Heft 18). Luftpyrometer für Temperaturen bis 1500° liefert Dr. Hermann Rohrbeck, Berlin NW., Karlstraße 20a, zu 200 Mk. Ein Luftpyrometer mit Federmanometer für gewöhnliche technische Zwecke ist zu beziehen von Alphons Custodis, Düsseldorf a. Rh.

349. Selbstkorrigierendes Barometer-Luftthermometer. Der Einfluß des Luftdruckes ist hier dadurch beseitigt, daß der offene Manometerschenkel durch ein Barometer ersetzt ist. Bei der Abänderung von C. G. Müller (Z. 8, 308, 1895, Fig. 2846 K, 90) ist außerdem ein kurzes offenes Rohr, in welchem sich ein Kolben verschieben läßt, angebracht. Als Sperrflüssigkeit für das Luftthermometer dient mit Indigo gefärbte 78proz. Schwefelsäure, welche achtmal leichter ist als Quecksilber. Der Lederkolben im offenen Schenkel hat einen langen Stiel aus dickem Stahldraht, welcher festgeklemmt werden kann. Durch Auf- und Abwärtsschieben desselben kann man den Säurefaden auf irgend einen bestimmten Punkt, z. B. auf den Zehngradstrich der Skala, einstellen.

Fig. 2846.



Die Temperaturangaben sind weithin bis auf $^1/_{10}{}^0$ ablesbar, da ein Grad 11 mm groß ist. Die Skala erstreckt sich von -1° bis $+28^o$. Das Verschieben des Kolbens erfolgt vor einer zweiten Skala, deren Angaben der Temperatur des Luftthermometergefäßes bei konstantem Volumen der abgesperrten Luftmenge entsprechen. Durch diese Skala, die Druckskala, kann man die vorerwähnte, die Volumenskala, leicht und sicher kontrollieren. Das Luftthermometer kann außerdem als genaues Heberbarometer dienen. Es ist in gefülltem Zustande versandfähig.

Auch das Luftthermometer von Weinhold (1873) ist eine verbesserte Form des Barometer-Thermoskops und eignet sich gut als Demonstrationsthermometer, kann indes an dieser Stelle nicht näher besprochen werden, da dabei elektromagnetische Vorrichtungen Verwendung finden [1]).

350. Reduktion der Gasvolumina. Sind p_0, p die Drucke, v_0, v die Volumina und τ_0, τ die absoluten Temperaturen derselben Gasmenge in zwei verschiedenen Zuständen, so ist: $\frac{p_0 \cdot v_0}{\tau_0} = \frac{p \cdot v}{\tau}$ oder $v_0 = v \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{\tau_0}{\tau}$. Hiernach läßt sich leicht das Volumen v_0 im sogenannten Normalzustande, d. h. für $p_0 = 760$ mm und $\tau_0 = 273^o$ finden, wenn v, p und τ ($= 273^o +$ Grade Celsius) bekannt sind [2]).

[1]) Große Luftthermometer für fundamentale Untersuchungen nach Wiebe u. Böttcher (Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1890, S. 18) liefert R. Fueß in Steglitz bei Berlin, Düntherstr. 8 zu 1200 Mk. — [2]) Ist m das Gewicht einer Gasmenge und μ das Molekulargewicht, so ist $\frac{p \cdot v}{\tau} = 0{,}0819 \cdot \frac{m}{\mu}$, die Größe rechts heißt Gaskonstante, m/μ die Anzahl Grammoleküle (die Erklärung kann erst in der Thermodynamik gegeben werden). Beim Druck von 1 Atm. und bei 0° beträgt hiernach das Volumen eines Grammoleküls eines Gases, welches auch dessen chemische Zusammensetzung sein mag, 22,3 Liter. Genauer lautet nach van der Waals die Zustandsgleichung $\frac{\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b)}{\tau} = Konst.$

Derartige Reduktionen sind z. B. auszuführen bei der Bestimmung der **Gasdichte**. Das spezifische Gewicht der trockenen Luft ist bei p mm und $t^0 = 0{,}001\,293 \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{273}{273\,t}$. Feuchte Luft kann bis 1 Proz. leichter sein, denn Wasserdampf ist nur $^5/_8$ so dicht als Luft. Beträgt die Spannkraft des in der Luft vorhandenen Wasserdampfs e, so erhält man die Dichte der Luft, indem man in obiger Formel $p - {}^3/_8\, e$ statt p setzt. Bei 50 Proz. relativer Feuchtigkeit ist das spezifische Gewicht der Luft annähernd $= 0{,}001\,295 \cdot \frac{p}{760} \cdot \frac{1}{1 + 0{,}004 \, . \, t}$.

351. Das Differentialthermometer. Der offene Schenkel eines Wasserbarometers ist ebenfalls mit einem kugelförmigen Gefäß versehen, welches meist an Größe dem anderen genau gleich ist (Fig. 2847).

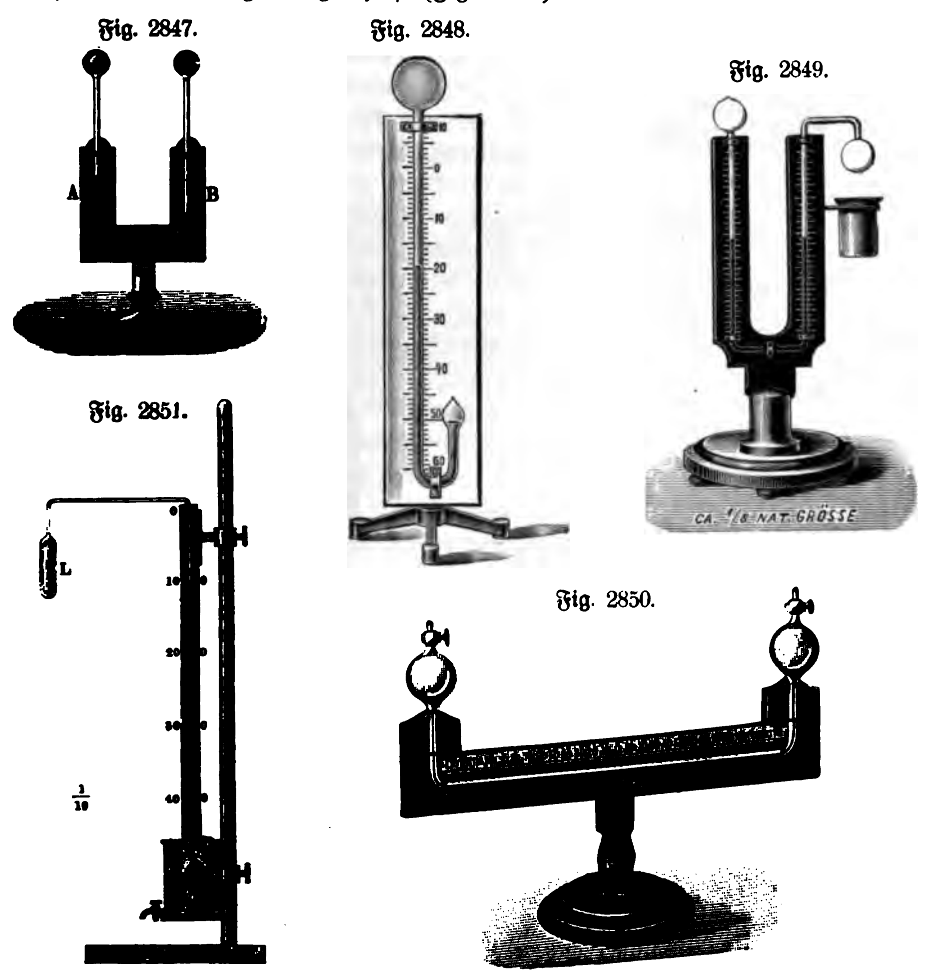
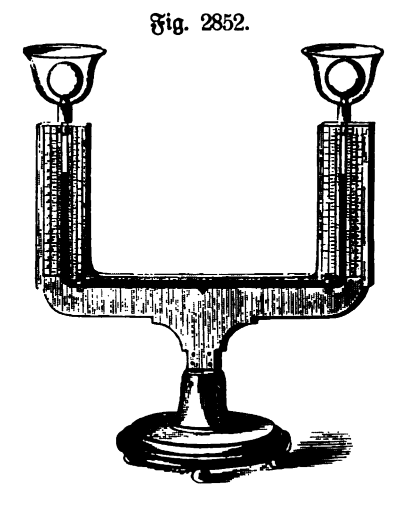


Fig. 2847. Fig. 2848. Fig. 2849. Fig. 2851. Fig. 2850.

Hierher gehört das **Thermoskop** von **Drebbel**, das älteste Instrument zur Schätzung von Temperaturen (Fig. 2848 Lb, 9). Da es von der Luft abgeschlossen ist, sind seine Angaben unabhängig vom Luftdruck. Nimmt die Temperatur beider Gefäße gleichmäßig zu oder ab, so ändert sich der Stand der Flüssigkeitssäule nicht,

es kann also nicht dazu dienen, Zimmertemperaturen zu bestimmen, sondern eignet sich nur zur Messung von Temperaturunterschieden. Immerhin kann es auch für ersteren Zweck brauchbar gemacht werden, indem man etwa das untere Gefäß mit Eis umgibt und dadurch auf konstanter Temperatur hält. Die gewöhnliche Ausführungsform des Differentialthermometers ist dargestellt in Fig. 2847. Andere Formen zeigen die Fig. 2849 (E, 20), 2850 (E, 16,50) und 2851 (Lb, 22,50).

Fig. 2852.



Schumann umgibt beide Kugeln mit kelchartigen Gefäßen (Fig. 2852 K, 15), in welche man z. B. Flüssigkeiten eingießen kann, deren Temperatur miteinander verglichen werden soll. Noch besser würden statt der Kugeln doppelwandige Kelche angewandt, wobei der Hohlraum zwischen beiden Wänden die Kugel ersetzen und der Innenraum des Kelches zur Aufnahme der warmen Körper dienen würde. (E, 17,50.) (Vgl. Fig. 3080, S. 1166 nach d'Arsonval.)

Fig. 2854.

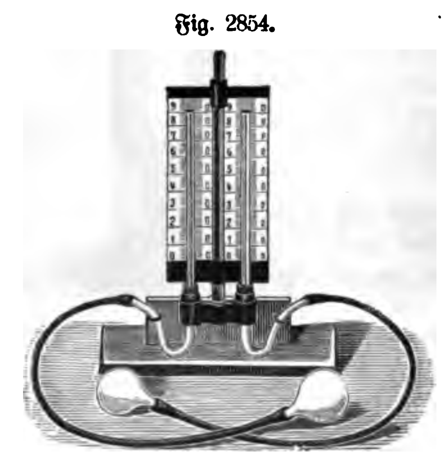
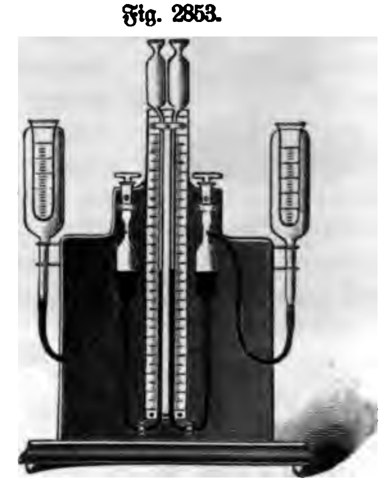


Fig. 2853.



352. **Doppelthermoskop.** Looser (Z. 8, 291, 1895 u. 11, 105, 1898) verwendet zu gleichem Zwecke ein „Doppelthermoskop", welches, wie Fig. 2853 (L, 44 bis 110) zeigt, aus zwei genau gleichen Thermoskopen besteht, deren Skalen dicht nebeneinander liegen. Als Indikatoren dienen gefärbter Alkohol und Indigolösung, die Rezeptoren (Gefäße) bestehen aus einer in Cubikcentimeter geteilten Röhre, an die eine andere sie umschließende angeschmolzen ist [1]). Ein einfacheres Instrument ist in Fig. 2854 (S, 15) dargestellt. Dasselbe ist für Projektion eingerichtet.

353. **Verdrängungsthermometer.** Luftthermometer für höhere Temperaturen gestalten sich besonders handlich nach dem von Crafts und Meyer ausgebildeten Verdrängungsverfahren, bei welchem das Gas durch ein anderes absorbierbares

[1]) Der Apparat ist mit verschiedenen Nebenapparaten zu beziehen von Robert Müller, Glasbläserei in Essen, zu 240 Mk.

Gas (Kohlensäure oder Salzsäure) aus dem Thermometer verdrängt und bei gewöhnlicher Temperatur gemessen wird. (Vgl. § 347, S. 1049.)

Ist nach Absorption des beigemischten absorbierbaren Gases (z. B. Kohlensäure) durch die Auffangeflüssigkeit (z. B. Kalilauge) das auf 0°, 760 mm und Trockenheit reduzierte Volum des ausgetretenen Gases $= v_0$, das des Gefäßes $= v$, so war die Temperatur des letzteren $273 (v - v_0) / v_0$.

354. Thermometrische Barometer. Eine Kombination von zwei Luftthermometern, deren einer vom Luftdruck unabhängig ist, kann dazu dienen, den Barometerstand zu ermitteln. Man kann eine Skala anbringen, welche aus der Differenz der Angaben direkt die Millimeter Quecksilberdruck ablesen läßt. Noch einfacher kann die Nullpunktsverschiebung eines einzelnen vom Luftdruck abhängigen Thermometers benutzt werden, oder überhaupt die Verschiebung rgend eines Skalenteils, z. B. des der Blutwärme entsprechenden.

Fig. 2855.

Hierauf beruht das Mundbarometer von Grützner (Ann. d. Phys. 9, 238, 1902). Es besteht aus einer flachen hohlen Glaskugel (siehe Fig. 2855), die in ein offenes Glasrohr mit Skala übergeht, in welchem sich ein Index aus gefärbtem Paraffinöl befindet. Man bringt die kleine Glaskugel unter die Zunge und stellt die Röhre mittels eines daran angebrachten Lotes vertikal. 1 mm Quecksilber entspricht etwa 0,74 mm der Skala [1]).

Nach ähnlichem Prinzip wirkt das Luftdruckaräometer von K. T. Fischer. Es ist ein Kartesianischer Taucher mit einem über das Wasser vorragenden, ähnlich wie ein Aräometer mit Skala versehenen Stiel. Ändert sich der Luftdruck, so ändert sich natürlich der Stand dieses Aräometers und man kann die Skala so eichen, daß sie Millimeter Quecksilber angibt, vorausgesetzt, daß die Temperatur des Wassers konstant, z. B. auf dem Gefrierpunkte gehalten wird [2]).

Man kann hier auch auf die sogenannte hypsometrische Formel zurückkommen, welche in der einfachsten früher besprochenen Form nur für gleichmäßige Temperatur der Luft gilt. (Vgl. § 294, S. 1002.)

355. Thermoregulatoren, beruhend auf der Ausdehnung von Gasen, wurden konstruiert von Kemp (1850), Westly (1850), Bunsen (1857), Guthrie (1868), Schorer (1871), Jeannel (1872), Milne-Edwards (1872), Martenson (1872), Myers (1872), Muencke (1876), Cresti (1878), d'Arsonval (1880), v. Baumhauer (1884) u. a. [3]).

Der Regulator von Muencke (3,50 bis 6,00 Mk.) besteht aus einem 18 mm weiten, 14 cm langen Glasrohre, mit seitlicher Ansatzröhre für die Gasverbindung mit dem Brenner (Fig. 2856). Ungefähr 10 cm vom Boden entfernt ist ein Glasröhrchen eingeschmolzen, dessen obere Hälfte etwa 8 mm, die untere Hälfte etwa $1^1/_2$ mm lichten Durchmesser besitzt. An der Verschmelzungsstelle ist das Rohr wulstig erweitert und bis hierher befindet sich der Regulator innerhalb des zu erwärmenden Ge-

[1]) Zu beziehen vom Universitätsmechaniker Albrecht in Tübingen. — [2]) Ferner gehört hierher das Glycerinbarometer von Behn u. Kiebitz (Phys. Zeitschr. 4, 543, 1903). — [3]) Thermoregulatoren verschiedener Konstruktion liefert Dr. H. Rohrbeck, Berlin NW., Karlstraße 20a. S. a. Bolm, Chemikerzeitung 1900, S. 225.

fäßes. In dem die weitere Röhre verschließenden Stopfen läßt sich das stählerne Gaszuleitungsrohr mit schräg angeschliffener Spitzenöffnung auf- und abschrauben. Dasselbe führt unterhalb des Gewindes eine Öffnung und drei kleine Ansätze zur zentralen Führung des Rohres. Das aufgeschliffene Winkelrohr dient zur Verbindung mit der Gaszuleitung. Um den Regulator in Funktion zu setzen, füllt man denselben mit so viel reinem Quecksilber, daß dieses etwa 33 mm hoch steht und zwar sowohl im weiteren Rohre wie in dem engeren, was durch Schütteln bald erreicht werden kann. Das obere Winkelstück verbindet man mit der Gaszuleitung, das seitliche Ansatzstück mit der Gaslampe, die zum Erwärmen des Kastens dient, und setzt den Regulator bis zur wulstigen Erweiterung in den Trockenkasten ein. Durch die Ausdehnung der im Regulator eingeschlossenen Luft wird das Quecksilber aus der zentralen engeren Röhre in die weitere gedrückt und zwar um so mehr, je höher die Temperatur ist. Man achte darauf, daß selbst bei der höchsten Temperatur im unteren Teile des Regulators noch eine genügende Menge Quecksilber enthalten sei, die verhindert, daß ein Teil der ausgedehnten eingeschlossenen Luft durch das engere Röhrchen entweichen kann, anderenfalls muß Quecksilber nachgefüllt werden. Zeigt das neben dem Regulator befindliche Thermometer diejenige Temperatur, die erreicht werden soll, so schraubt man das Gaszuleitungsrohr so weit in das Quecksilber, bis der konische Schlitz vom Quecksilber ganz bedeckt wird; die Flammengröße verkleinert sich dabei und die Gaslampe brennt bald mit einer sehr kleinen Flamme, deren Größe von der kleinen Öffnung in der stählernen Röhre und dem Gasdrucke abhängig ist. Mit dieser kleinen Flamme brennt die Lampe so lange, bis durch Temperaturerniedrigung der Schlitz an der Gasausströmungsspitze sich wieder allmählich öffnet, die Flamme vergrößert u. s. w. Damit kein Zurückschlagen der Bunsenbrenner eintreten kann, müssen dieselben mit Drahtnetzkappen versehen werden.

Fig. 2856.

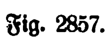
Der Apparat von d'Arsonval ist im wesentlichen ebenso konstruiert, wie der später zu beschreibende mit flüssigem Inhalt (§ 368, S. 1074). Das Gefäß ist durch ein Bleirohr mit dem eigentlichen Regulator verbunden, welcher eine achtfache Kautschukmembran enthält. Dieselbe kann unter Vermittelung eines Stempels durch einen einarmigen Hebel mit Laufgewicht stark belastet werden, so daß sie erst nach bedeutender Vergrößerung des Druckes, d. h. Steigerung der Temperatur, sich ausbaucht und den Gaszufluß mindert.

Einigermaßen abweichend von den beschriebenen ist der Regulator von Soret (1885), speziell für Wasserbäder berechnet. Derselbe wirkt nicht auf die Heizflamme ein, sondern mäßigt die Temperatur des Bades durch Zuführung von kaltem Wasser, wobei durch ein Überfallrohr dafür gesorgt wird, daß das Niveau des Wasserbades konstant bleibt. Der Zufluß des kalten Wassers wird im übrigen nach gleichem Prinzip automatisch reguliert, wie bei den beschriebenen Regulatoren der Zufluß des Gases zum Brenner.

Alle diese Regulatoren haben naturgemäß den Fehler, daß sie vom Luftdrucke abhängen. Für genauere Regulierung auf längere Dauer benutzt man deshalb solche, welche auf Ausdehnung der Flüssigkeiten beruhen.

356. **Heißluftmotoren.** Die Druckzunahme eines Gases beim Erhitzen kann dazu dienen, einen Kolben zu verschieben und hierdurch mechanische Arbeit zu er-

zeugen. Das Prinzip der sogenannten Heißluftmotoren besteht darin, daß durch einen Schieber, den sogenannten **Verdränger**, das Gas bald in den erhitzten, bald in den durch Wasser gekühlten Teil des Cylinders geschoben und hierdurch ein wechselnder Druck auf den den Cylinder abschließenden **Arbeitskolben** ausgeübt wird, wie dies bereits auf S. 94 näher erläutert wurde. Zwei kleine Modelle zeigen die Fig. 2857 (Lb, 27) und 2858 (Lb, 42 bis 600).


Fig. 2857.

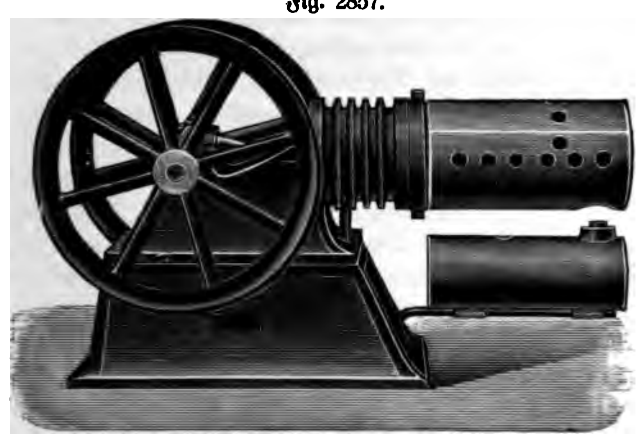
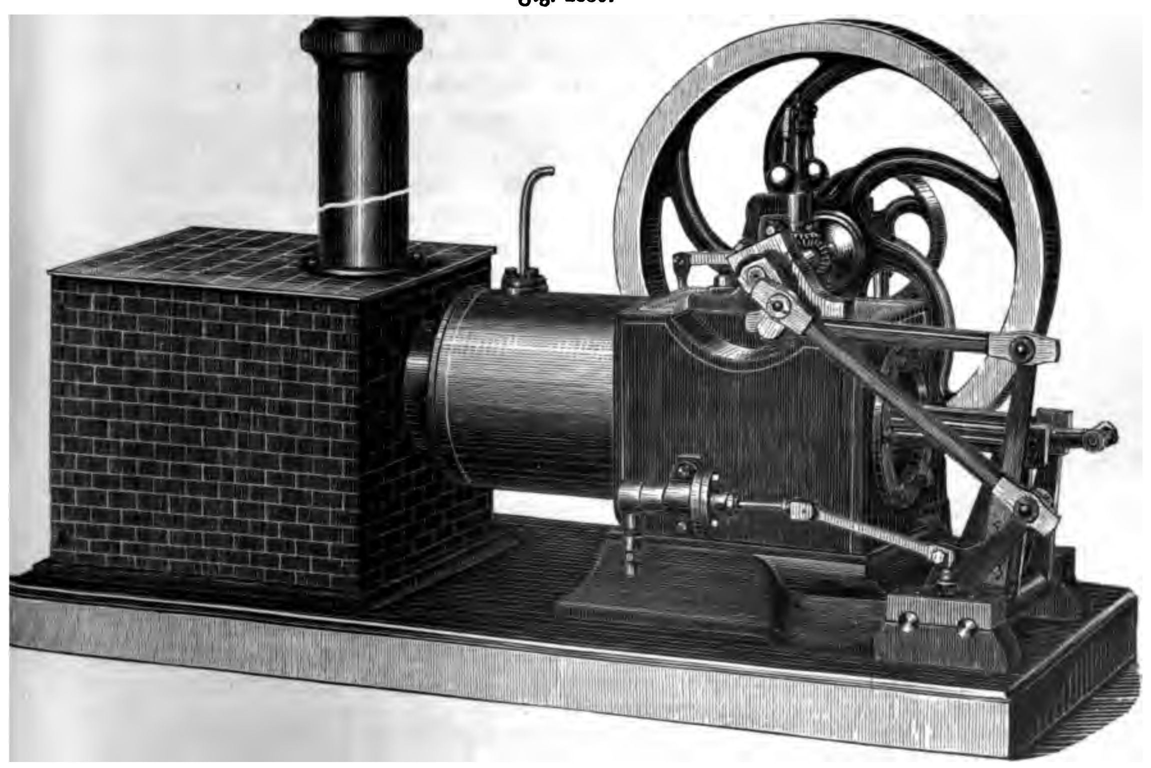


Fig. 2858.



Fig. 2859.



Ein größeres Modell zeigt Fig. 2859 [1]). Der Verdränger, ist ein leichter, voluminöser, die Wärme schlecht leitender Körper (hohler beiderseitig geschlossener Metallcylinder), welcher nicht dicht an die Wandungen des Cylinders anschließt und durch eine den Kolben durchdringende Stange hin und her geschoben werden kann. Wird er nach dem heißen Ende hingeschoben, so verdrängt er die heiße Luft aus diesem, sie gelangt in die kalte Hälfte und kühlt sich dort ab, so daß der Druck im Inneren des Cylinders sinkt und der Kolben durch den Überdruck der äußeren Atmosphäre in den Cylinder hineingedrückt wird. Verschiebt man den Verdränger nach dem kalten Ende, so wird das dort befindliche Gas nach dem heißen Ende gedrängt, es erwärmt sich, der Druck steigt und der Kolben wird wieder zurückgedrückt. Da nun die Maschine das Hin- und Herschieben des Verdrängers automatisch besorgt, so wiederholt sich dieses Spiel kontinuierlich und das Schwungrad kommt in konstante Drehung.

Fig. 2860.



Die Kraft, mit welcher der Arbeitskolben sich verschiebt, ergibt sich aus dem Gay-Lussacschen Gesetze [2]).

375. Verbindung von Gasen beim Erwärmen. Wird ein enges Galileisches Thermoskop mit einem Gemisch von Wasserstoff und Sauerstoff gefüllt und das offene Ende zugeschmolzen, so daß zwischen Index und Ende der Röhre noch eine Luftsäule eingeschlossen bleibt, welche eine Verschiebung des Index ermöglicht (und gleichzeitig auch den herrschenden Druck zu messen gestattet), und erhitzt man nun das Instrument wiederholt mehrere Stunden in einem Bade von der Temperatur des siedenden Schwefels und kontrolliert jeweils nach dem Abkühlen die Stellung des Index, so zeigt sich nach van't Hoff (1885) eine immer zunehmende Verdichtung des Gases, der Index entfernt sich vom geschlossenen Ende der Röhre infolge der Vereinigung der beiden Gase zu Wasserdampf. Die (von der Temperatur abhängige) Reaktionsgeschwindigkeit ist in diesem Falle außerordentlich gering. Eine vollständige Vereinigung der beiden Gase erfolgt überhaupt nicht, vielmehr wird schließlich ein Gleichgewichtszustand (chemisches Gleichgewicht) erreicht, insofern gleichzeitig bei derselben Temperatur auch die entgegengesetzte Reaktion, das Zerfallen von Wasserdampf in Wasserstoff und Sauerstoff stattfindet und augenscheinlich die Zusammensetzung des Gemisches sich nicht mehr ändern kann, wenn die beiden Reaktionsgeschwindigkeiten, die von den Massen der in dem Gemisch vorhandenen Gase abhängen (Gesetz der Massenwirkung), einander gleich geworden sind. Die teilweise Wiederzersetzung des gebildeten Wasserdampfes wird als Dissoziation bezeichnet.

[1]) Zu beziehen von Kleist, Leipzig, zu 70 bis 300 Mk. Verschiedene kleine Motoren von $^1/_{60}$ bis $^1/_5$ Pferdekraft liefern E. Leybolds Nachf. in Köln, Brüderstraße 5, zu 42 bis 600 Mk., H. Raab, Zeitz, Heinrici in Zwickau i. S., Leppin u. Masche, Berlin (Fig. 2860, 48 Mk.). — [2]) An dieser Stelle kann natürlich nur das statische Gleichgewicht etwa beim Heben eines Gewichts besprochen werden.

Die Entzündung einer Leuchtgasflamme durch ein brennendes Streichholz ist ein Beispiel der Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit durch Temperaturerhöhung.

358. Dissoziation der Gase. Dieselbe kommt vor allem zum Ausdruck durch Anomalien der thermischen Ausdehnung, insofern bei steigender Temperatur das Gleichgewicht sich zugunsten der getrennten Gase verschiebt, bei fallender im umgekehrten Sinne. Sie kann nachgewiesen werden z. B. durch rasche Abkühlung des stark erhitzten Gases. Wird Wasserdampf durch ein intensiv glühendes Platinrohr geleitet und sofort abgekühlt, so bleibt Knallgas übrig.

Als Umwandlungstemperatur kann man (nach A. Naumann) die Temperatur betrachten, bei welcher das Gas zur Hälfte aus Gemisch, zur Hälfte aus chemischer Verbindung besteht.

Der S. 1049 beschriebene Apparat von V. Meyer kann auch dazu dienen, die Dissoziation nachzuweisen, insofern infolge derselben manche Gase innerhalb gewisser Temperaturgrenzen ihr Volumen z. B. auf das Doppelte vergrößern, bezw. auf die Hälfte verkleinern.

Bei Untersalpetersäure, N_2O_4, läßt sich die Spaltung (in $2NO_2$) schon an der beim Erhitzen rasch intensiver werdenden Färbung erkennen. Bei einigen Gasen läßt sich die Dissoziation auch dadurch nachweisen, daß man sie durch ein erhitztes Rohr leitet, in welchem sich eine zweite poröse Röhre befindet, in welche der eine Bestandteil rascher hineindiffundiert als der andere (Atmolyse).

Auch sogenannte chemisch einfache Körper unterliegen einer Dissoziation. Joddampf geht zwischen 600 und 1500° aus dem zweiatomigen Zustande in den einatomigen über, ebenso Bromdampf oberhalb 1200°. Schwefeldampf vermindert sein Molekulargewicht von 468° bis 1719° von S_7 bis S_2, Phosphor von P_4 auf P_3, Arsen von As_4 auf As_2.

359. Ausdehnung tropfbar flüssiger Körper. Um das Faktum der Ausdehnung flüssiger Körper zu zeigen, insbesondere auch den bedeutenden Unterschied der Aus-

Fig. 2861.



Fig. 2862.



dehnung flüssiger und gasförmiger Körper, kann man, wie Fig. 2861 zeigt, einen mit gefärbtem Wasser gefüllten Glaskolben schräg auf einen Dreifuß setzen, so daß das Wasser eben auszutropfen beginnt, und einen Brenner darunter setzen. Durch einen eingehängten Docht kann man das Austropfen erleichtern. Das beim Erhitzen austropfende Wasser fängt man in einem Maßcylinder auf.

Bequemer ist ein Gefäß wie Fig. 2862. Man füllt es durch Erwärmen mit irgend einer Flüssigkeit und läßt es erkalten; nachher entfernt man, etwa durch Fließpapier, die Flüssigkeit aus dem Trichter und Halse bis an das Zeichen *a* und erwärmt das Gefäß von neuem, wobei dann die Flüssigkeit wieder in den Trichter steigt.

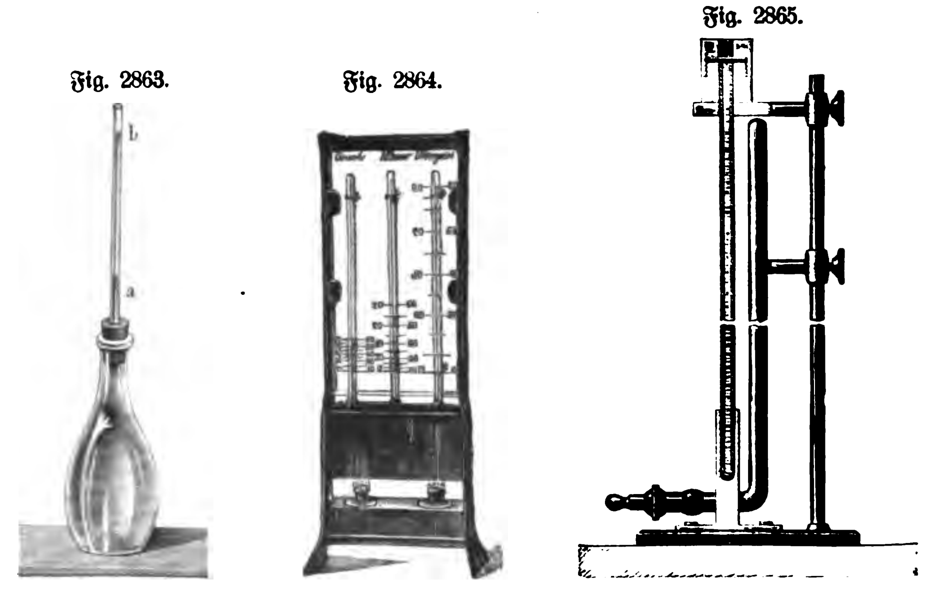
Hat man kein solches Gefäß, so kann man, nach Fig. 2863, aus jeder Flasche und Röhre ein solches zusammensetzen.

Ebenso wie bei Gasen gilt die Formel $v = v_0 (1 + \gamma t)$, worin γ den Ausdehnungskoeffizienten bedeutet, doch ist dieser von der Natur der Flüssigkeit abhängig z. B. für:

Äther	0,001 63	Petroleum	0,000 92
Alkohol	0,001 10	Terpentinöl	0,000 94
Benzol	0,001 24	Toluol	0,001 09
Chloroform	0,001 26	Wasser	0,000 06
Glycerin	0,000 50	Quecksilber	0,000 181.

Petroleum hat hiernach wesentlich stärkere Ausdehnung als Wasser. Dasselbe läßt sich durch Alkanna rot färben.

Looser (Z. **15**, 266, 1902) weist die Ungleichheit der Ausdehnung verschiedener Flüssigkeiten, z. B. Wasser und Alkohol, nach, indem er mit denselben gefüllte, gleich große mit Steigrohr versehene Kolben in warmes Wasser setzt [1]).


Fig. 2863. Fig. 2864. Fig. 2865.

360. Die Größe der Kraft, mit welcher die Ausdehnung erfolgt, ergibt sich aus der geringen Kompressibilität der Flüssigkeiten. Man kann sie zur Anschauung bringen durch Sprengen einer zugeschmolzenen, ganz mit Wasser gefüllten Glasröhre.

Bei dem Apparat von Tommasi (Fig. 2865 Lb, 125) drückt das in ein starkwandiges Eisenrohr eingeschlossene Öl beim Erhitzen aus der die Röhre oben abschließenden Bleiplatte ein rundes Stück heraus.

[1]) Leppin u. Masche, Berlin SO., Engel-Ufer 17, liefern eine Zusammenstellung von drei Dilatometern (Fig. 2864), welche die verschiedene Ausdehnung von Wasser, Weingeist und Quecksilber zeigen.

Messende Versuche über Druckzunahme bei Erwärmung unter Konstanthaltung des Volums sind schwierig auszuführen. Es könnte dazu das Piezometer benutzt werden, indem man die Ausdehnung durch Kompression wieder kompensiert.

Fig. 2867.

361. Bestimmung mit Aräometer. Anstatt die Ausdehnung direkt nachzuweisen, kann man auch die Änderung des spezifischen Gewichtes mittels eines Schwimmers wie Fig. 2866 (E, 5,25) und Fig. 2867 (K, 3 bis 5), welcher in warmem Wasser untersinkt, in kaltem schwimmt, zeigen. Zweckmäßig wird das Gefäß, welches den Schwimmer enthält, durch umgeleitetes warmes Wasser (vergl. S. 137) nach und nach immer stärker erwärmt. Bei einem bestimmten Temperaturpunkt sinkt der Schwimmer. Sehr hübsch gestaltet sich der Versuch bei einer Röhre mit mehreren verschieden gefärbten Schwimmern von verschiedenem spezifischen Gewicht, welche nacheinander sinken. Er läßt sich leicht objektiv machen, wobei man das Wasser in dem Troge durch eine Dampfschlange aus dünnem Zinnrohr allmählich erwärmt.

Fig. 2866.

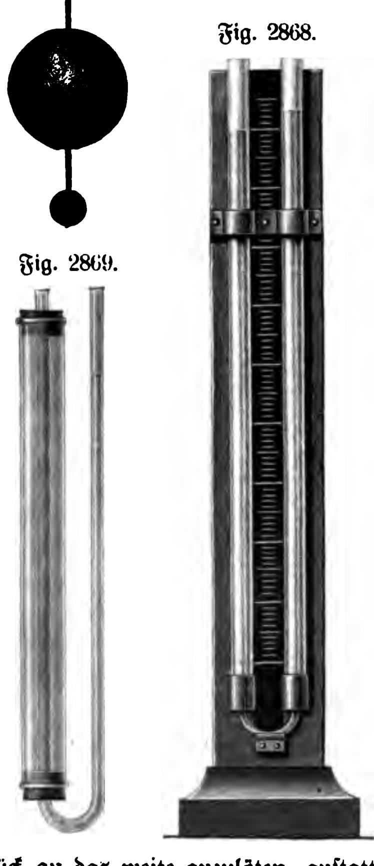


Fig. 2868.

Fig. 2869.

362. Bestimmung mit dem Hydrometer. Unabhängig von der Ausdehnung des Glases kann man die Ausdehnung des Wassers durch den in Fig. 2868 abgebildeten Apparat zeigen; er besteht aus zwei etwas weiten Glasröhren, welche einerseits verkorkt und durch eine dünnere gebogene Röhre in Verbindung gesetzt sind. Das ganze System ist auf ein Brettchen befestigt, auf welchem eine Skala verzeichnet ist. Man füllt nun zuerst die Röhren halb voll kalten Wassers und gießt dann langsam in die eine heißes Wasser, indem man dieses an der Röhre herablaufen läßt, bis beide Röhren beinahe voll sind. Es steht dann das warme Wasser immer um 3 bis 4 cm höher als das kalte. Noch besser geht der Versuch, wenn die enge Röhre mit einem Hahn versehen ist, den man erst öffnet, wenn bereits jede Seite mit ihrem Wasser gefüllt ist. Wird ein Hahn angebracht, so ist es auch leicht, das enge Röhrenstück an das weite anzulöten, anstatt Korke anzuwenden. Man kann auch die enge Röhre so lang nehmen, daß sie durch die Korke hindurch in die weiten bis oben hinaus reicht; die enge wird dann mit gefärbtem, eine der weiten mit heißem, die andere mit kaltem reinem Wasser gefüllt.

Andere Formen des Apparates sind dargestellt in den Fig. 2869 (Lb, 2,50), speziell zur Bestimmung der Ausdehnung von gefärbtem Petroleum durch Eingießen

von warmem Wasser in die weite, den einen Schenkel umgebende Röhre; Fig. 2870 (K, 3); Fig. 2871 (K, 13,50); Fig. 2872 (K, 255). **Die letzteren beiden** sind speziell zur Messung der Ausdehnung des Quecksilbers bestimmt.

Ich benutze einen ähnlichen Apparat, bei welchem sich der eine Schenkel durch umgeleiteten Dampf erwärmen läßt. Die Röhren sind etwa 1,5 m lang, so daß die Niveaudifferenz auch auf größere Entfernung deutlich hervortritt.

Sind h, h_1 die Höhen, d, d_1 die Dichten der Flüssigkeit in den beiden Zuständen und v, v_1 die Volumina, so ist $h : h_1 = d_1 : d$; $v : v_1 = d_1 : d$

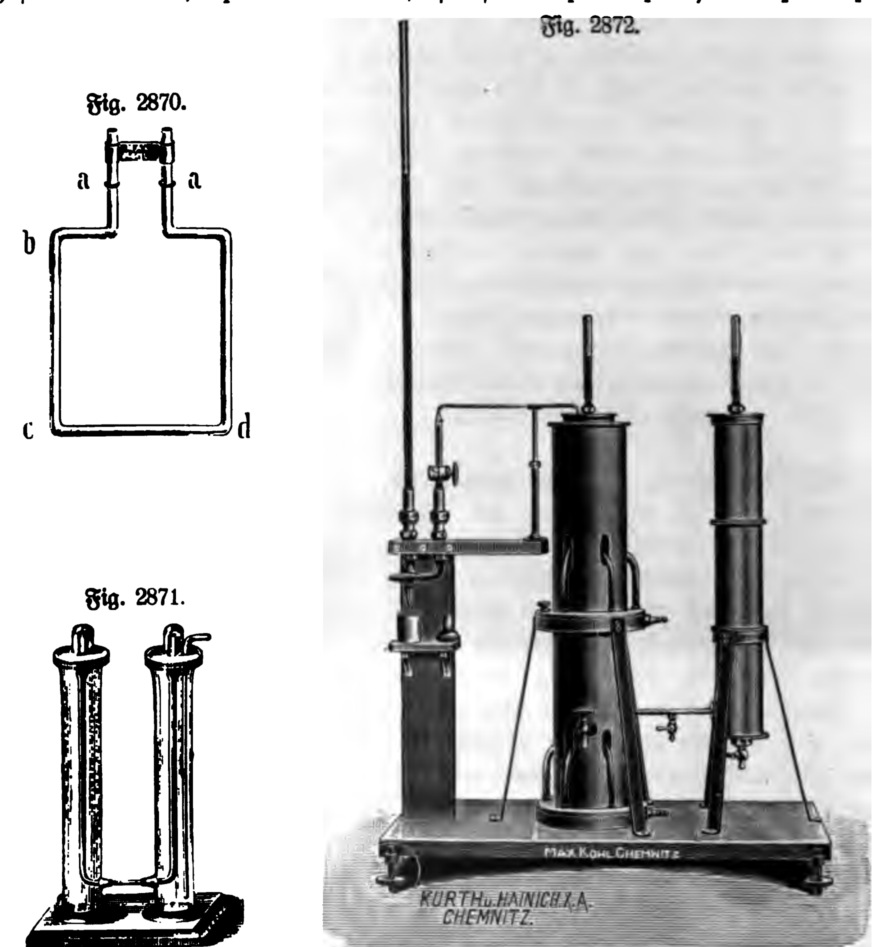


Fig. 2870. Fig. 2871. Fig. 2872.

$= v_0 : v_0\,(1 + \gamma t)$, somit $1 + \gamma t = d_1/d = h/h_1$. Für 80° Temperaturerhöhung war $h = 110$, $h_1 = 115$, somit $\gamma = \left(\frac{115}{110} - 1\right)\cdot\frac{1}{80} = 0{,}0005$.

Man kann auch, wenn die Röhren genügend weit sind, in beide enge Messingröhren einführen und abwechselnd die eine, dann die andere von Dampf bezw. kaltem Wasser durchströmen lassen. Dabei ändert sich dann jeweils der Flüssigkeitsstand.

363. Bestimmung mit dem Densimeter. Bequemer ist das oben S. 970 erwähnte pneumatische Densimeter aus kommunizierenden Manometern. Die Manometer werden an eine Leitung mit konstantem Druck, z. B. die Gasometer-

leitung (vergl. S. 132), angeschlossen. Für Quecksilber kann man auch zwei Barometer gebrauchen, von welchen das eine mit einem Dampfmantel umgeben ist, da entsprechend der Temperatur der Barometerstand zunimmt, oder auch zwei miteinander in Verbindung stehende Quecksilbermanometer, von welchen sich das eine durch umgeleiteten Dampf heizen läßt.

Biernacky (Z. 13, 217, 1900) läßt das eine von warmem, das andere von kaltem Wasser umfließen (Fig. 2873 [1]).

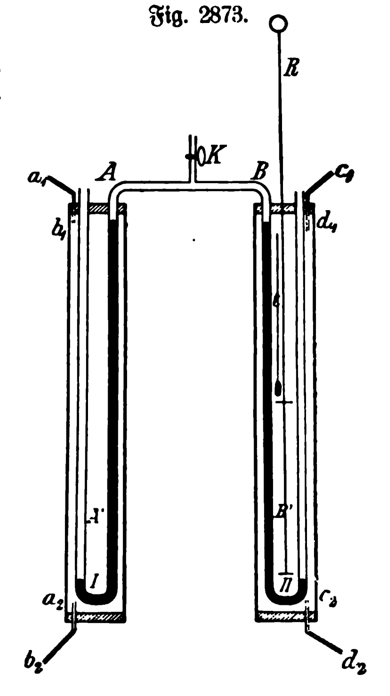


Fig. 2873.

Hieran anschließend kann man die Reduktion eines Barometer- oder Manometerstandes auf 0° besprechen.

Da sich das Quecksilber pro Grad um 0,000 181 seines Volumens ausdehnt, so müßte eine Quecksilbersäule von der Höhe l, welche einem Luft- oder Gasdruck bei der Temperatur t das Gleichgewicht hält, bei der Temperatur 0° die Höhe $b = l - 0{,}000\,181 \,.\, l \,.\, t$ haben. Solche Reduktion des Barometerstandes ist immer nötig, da die Temperatur beständig wechselt.

364. Ungleichmäßigkeit der Ausdehnung. Der Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeiten ist nicht wie der der Gase konstant, sondern ändert sich erheblich mit der Temperatur. Ein Flüssigkeitsthermometer gibt also nicht ohne weiteres die richtige Temperatur an, wenn es ebenso geeicht ist wie das Luftthermometer, man muß vielmehr durch Vergleich mit letzterem die Skala korrigieren oder „empirisch" eichen [2]).

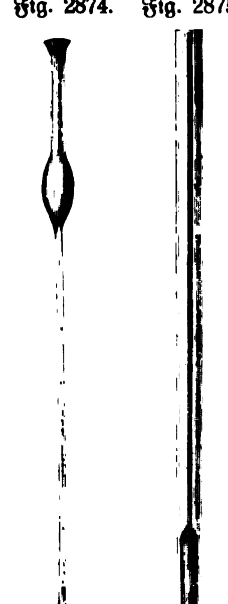
365. Verfertigung von Thermometern. a) Wahl der Glasröhren. Von den 5 bis 10 m lang gezogenen Röhren sind nur die mittleren 1 bis 2 m brauchbar. Das Glas muß reines Kali- oder reines Natronglas sein, am besten „Jenaer Normalthermometerglas", zu beziehen aus dem glastechnischen Laboratorium in Jena. Thermometer, deren Gläser Kali und Natron zugleich enthalten, zeigen starke Veränderlichkeit im Nullpunkte. Die Röhren werden unmittelbar nach der Anfertigung in ungefähr 4 bis 6 dm lange Stücke zerschnitten und sogleich an beiden Enden zugeschmolzen. Glasröhren mit flachem Kanale haben für den gewöhnlichen Gebrauch der Thermometer leicht erkennbare Vorzüge, runde sind aber sicherer zu kalibrieren. Diese letztere Arbeit geschieht in der Art, daß man durch Saugen eine Quecksilbersäule von etwa 3 cm Länge in die Röhre bringt, und dann durch gelindes Stoßen der Röhre dieses Quecksilber nach und nach durch die ganze Röhre hindurch führt, während man die Länge desselben mit seiner auf dem Papier gezeichneten anfänglichen Länge stets sorgfältig vergleicht. Hat man irgend ein Stück der Röhre gleich weit gefunden, und wäre es auch nur 1 dm, so wird es durch

[1]) Zu beziehen von P. Altmann in Berlin. — [2]) Mit der Verschiedenheit der Ausdehnungskoeffizienten hängt auch der verschiedene Gang z. B. eines Quecksilber- und eines Ölthermometers zusammen, die bei 0° und 100° übereinstimmen.

umgebundenen gewichsten Faden bezeichnet und später so ausgebrochen, daß das bei dem Aufblasen der Kugel verloren gehende Glas aus dem ungleich weiten Teile genommen wird. Man wird nämlich bei diesem Versuche bald die unangenehme Erfahrung machen, wie selten gleichweite Thermometerröhren sind. Für den gewöhnlichen Thermometermacher hat dies nichts zu bedeuten, die guten Röhren legt er für genaue Thermometer bei Seite, und aus den weniger guten werden die zahllosen Zimmerthermometer gefertigt, die ja ohnehin nur bis etwa + 30° R. richtig zu sein brauchen und bis dahin nach einem Normalthermometer graduiert werden.

Das Aufsaugen der Probesäule von Quecksilber muß mit der Vorsicht (eventuell unter Benutzung einer Chlorcalciumröhre) geschehen, daß keine Feuchtigkeit in die Röhre kommen kann, denn solche ist fast nicht mehr herauszubringen; das einzige Mittel, welches noch einigen Erfolg hat, besteht darin, daß man nach dem Aufblasen der Kugel zugleich die ganze Röhre, ausschließlich der Kugel, recht erhitzt und dann erst auch die Kugel erwärmt, wo dann die aus der Kugel austretende Luft den Wasserdampf forttreibt. Sollte eine andere Unreinigkeit in eine Thermometerröhre gekommen sein, so gebe man dieselbe nur sogleich verloren.

b) Bearbeitung der Röhre. Nachdem die Röhre einerseits verschlossen und aufgestaucht ist, wird an das Ende eine Kugel aufgeblasen, wobei man ebenfalls sorgfältig verhüten muß, in die Röhre Feuchtigkeit zu bringen. Da aber dieses bei aller Sorgfalt dennoch manchmal geschieht, so ist es zweckmäßiger, die Röhre beiderseits zu verschließen, sie zuerst der ganzen Länge nach heiß zu machen, dann aber das eine Ende in die Flamme zu bringen und durch die Elastizität der Luft eine kleine Kugel aufzutreiben. Man öffnet sodann die Röhre am anderen Ende, verschließt sie nach dem Erkalten wieder, erhitzt sie von neuem der ganzen Länge nach, um die Kugel noch mehr aufzutreiben. Ist diese etwa 5 mm weit, so richtet man das Feuer auf das Ende der Kugel, um diese vorn platzen zu machen, worauf die Öffnung durch ein Eisenstäbchen erweitert und durch Zusammenschmelzen der Lappen, welche durch das Aufplatzen entstanden, verstärkt wird. Es wird nun eine ziemlich dünnwandige, etwa 3 bis 5 mm weite Glasröhre hier angeschmolzen und die Schweißstelle etwas aufgeblasen. Nun erst staucht man das andere Ende und bläst die Kugel auf, wobei nun keine Feuchtigkeit in die Thermometerröhre kommt. Die fertige Röhre hat jetzt die Gestalt wie Fig. 2874, und ist zugleich auf das zweckmäßigste zur Füllung vorbereitet. Man kann die erste Kugel auch durch einen angebundenen Kautschukbeutel aufblasen. Einige blasen auch durch einen solchen die Thermometerkugel selbst auf, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhüten.


Fig. 2874. Fig. 2875.

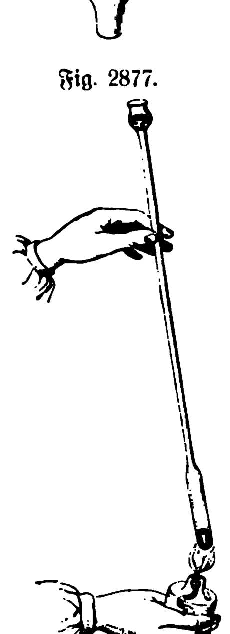
Wenn die Röhre, wie sich durch Vergleich mit einem fertigen Thermometer beurteilen läßt, eine Kugel von mehr als 10 bis 15 mm Durchmesser erforderte, so müßte ein Cylinder angeschmolzen werden, wozu man die Röhre erst einerseits verschließt und wie oben eine Röhre von 10 bis 12 cm ansetzt. Die Schweißstelle wird gar nicht oder nur ganz schwach aufgeblasen. Nachher erst schmilzt man den

überflüssigen Teil der Röhre ab. Man schmilzt auch häufig an starke Thermometerröhren 5 bis 8 mm dicke Cylinder von etwas geringerer Weite, um das fertige Thermometer durch Kork oder andere enge Öffnungen stecken zu können, wobei dann die Skala auf die Thermometerröhre geätzt wird. Man kann auch an das bereits verschlossene Ende der Thermometerröhre irgend ein Glasstäbchen anschmelzen, dann eine kleine Kugel aufblasen und sie durch Strecken in einen Cylinder verwandeln. Oben oder unten an diesem setzt man das Aufblasen und Strecken fort, bis der erforderliche Cylinder vorhanden ist, worauf man das von der Röhre abgewendete Ende desselben abzieht und halbkugelförmig aufbläst (Fig. 2875).

c) Das Füllen. Man nimmt durch Schütteln mit verdünnter Salpetersäure gereinigtes und nachher wieder mit Wasser ausgewaschenes und mit Fließpapier getrocknetes Quecksilber, das man vorher durch Kochen von Luft befreit. Hat man nicht, wie soeben angeführt wurde, eine weitere Röhre angeschmolzen, so nimmt man einen kleinen Glastrichter oder eine wie Fig. 2876 unten verengte, etwa 1 cm weite Glasröhre, umwickelt das Ende der Thermometerröhre mit Papier und steckt sie fest in die Röhre des Trichters. Das Quecksilber wird noch warm durch einen Papiertrichter in den Glastrichter gefüllt und sodann die ganze Röhre nebst der Kugel über einer Weingeistlampe erhitzt, wodurch Luft ausgetrieben wird und dafür beim Erkalten Quecksilber in die Kugel tritt. Erhitzt man nun zum zweiten Male die Röhre und bringt darauf das Quecksilber in der Kugel ins Kochen, so wird dadurch beinahe alle Luft aus der Kugel entfernt. Darum darf man jetzt auch die Kugel nur langsam von der Flamme entfernen, weil sonst das hineinstürzende Quecksilber dieselbe zerschlagen könnte. In der Regel wird auch jetzt noch eine kleine Luftblase da zurückbleiben, wo die Kugel an der Röhre sitzt; allein man läßt nun das Thermometer erkalten, damit die Kugel möglichst viel Quecksilber aufnehme. Später erwärmt man das Thermometer von neuem in senkrechter Lage, wobei durch die Ausdehnung des Quecksilbers in der Kugel die Luftblase durch die Röhre hinaufgetrieben wird. Sowie man vermutet, daß das Quecksilber unter der Blase das Ende der Röhre erreicht habe, entfernt man das Feuer und gibt Acht, ob etwa die Luftblase sich wieder in die Röhre zurückziehen will. Wäre dieses der Fall, so erwärmt man etwas stärker und rührt ein wenig im Quecksilber an der Öffnung der Thermometerröhre mit einer Stricknadel. Viel leichter geht alles dieses mit der angeschmolzenen Röhre (Fig. 2877 K, 1), in welcher selbst das Quecksilber vor dem Füllen ausgekocht wird, und wo man die Luftblasen nie aus dem Auge verliert. Sollte, was doch mitunter der Fall ist, ein nadelfeines Luftbläschen zurückbleiben, so hätte dieses nichts zu sagen, wenn es nur in der Kugel wäre; allein es dürfte nicht so groß sein, daß man dasselbe schon vor dem Verschlusse der Röhre bemerken kann, weil es sonst bei Entfernung des äußeren Luftdruckes zu groß würde. So oft man die Röhre erkalten läßt, sollte man auch das Quecksilber in der weiten Röhre wieder vorher auskochen, ehe man die Kugel wieder erwärmt.

Fig. 2876.

Fig. 2877.



Manchmal gibt es kein anderes Mittel, ein Bläschen aus der Röhre zu entfernen, als daß man an dieser Stelle die Röhre erhitzt, bis sich der Faden ganz trennt und dann rasch auch die Kugel erwärmt, um so die Blase so lange aufwärts zu treiben, bis sich das Quecksilber beim Bläschen wieder vereinigt. Man läßt dann erkalten und fängt dasselbe Verfahren nochmals an, vorausgesetzt, daß das Bläschen am Glase hängen bleibt und das Quecksilber an ihm vorbeigeht; andernfalls muß man die Röhre an der neuen Stelle wieder erhitzen und das Bläschen bis in die weite Röhre zu treiben versuchen.

Nach vollständiger Erkaltung der Röhre wird das Quecksilber aus dem Trichter ausgegossen und durch Erwärmung der Kugel auch ein oder zwei Tröpfchen aus der Röhre entfernt, um durch einen vorläufigen Versuch zu ermitteln, wie lang zehn Grade auf dem Thermometer werden, worauf man sich entschließt, auf welche Weise man die vorhandene Länge des Thermometers benutzen will. Gewöhnliche Thermometer sollten bis 30° oder 40° C. unter Null gehen, allein man wird vielleicht in einem und dem anderen Falle zufrieden sein müssen, wenn das Thermometer auch nur etwa fünf Grade unter Null geht, um entweder den Siedepunkt noch zu erreichen, oder ihn bedeutend überschreiten zu können, was geschehen kann bis zu 360° C. Je nach diesen Umständen wird man nun an die Röhre ein Zeichen machen, bis wohin die gegenwärtige Lufttemperatur kommen soll, um danach durch weitere Erwärmung noch mehr Quecksilber zu entfernen, oder, was freilich unangenehm ist, das entfernte wieder zu ersetzen. Letzteres geschieht dadurch, daß man abermals ausgekochtes Quecksilber in den Trichter bringt und das Thermometer soweit erhitzt, daß sich das Quecksilber der Röhre mit jenem im Trichter wieder vereinigt, worauf man von neuem anfangen muß, das Quecksilber auszutreiben. Bei einem aufgeschmolzenen Trichter kann man mittels eines fein ausgezogenen Glasröhrchens ein beliebig großes Tröpfchen Quecksilber in denselben und auf die Öffnung der Röhre bringen, um es zuzusetzen.

Fig. 2878.

Für Weingeist werden die Röhren weiter, bis 1/2 mm weit, genommen, da man sonst den Weingeistfaden nicht gut sehen würde, obwohl man ihn gewöhnlich mit Fernambuk oder Cochenille rot färbt. Um Cochenilletinktur zu machen, wird die Cochenille in einer Porzellanschale fein zerrieben, sodann mit Weingeist zu einem Brei gemacht und dieser noch längere Zeit fein abgerieben. Man setzt dann mehr Weingeist und ein weniges Schwefelsäure zu, rührt die Masse gut auf, läßt sie etwas absitzen und gießt dann auf ein Filter. Der Rest wird nochmals mit Weingeist ausgewaschen und dann die zurückbleibenden bleigrauen Schüppchen entfernt. Was sich auf dem Filter sammelt, wird nochmals in die Reibschale genommen, von neuem gerieben u. s. f., so lange dasselbe hinlänglich gefärbte Flüssigkeit gibt. Man erhält von 1 g etwa 125 g Tinktur. Cochenille setzt gern Farbstoff ab, darum nimmt man vorzugsweise Fernambuk zum Färben des Weingeistes. Zum Füllen wird die Röhre sogleich in eine Spitze ausgezogen und diese nach dem Er-

[…]en der Kugel in eine Schale mit dem schwach ausgekochten Weingeist von etwa […] bis 70 Proz. gesenkt, wie Fig. 2878 zeigt.

d) Das Schließen der Röhre. Wenn der Quecksilbergehalt reguliert ist, […]milzt man die weitere Röhre ab und zieht dabei die Thermometerröhre in eine […]nlich feine Spitze aus; letzteres geschieht auch, wenn nur ein […]ichter aufgesetzt wird. Das Thermometer wird nun erwärmt, […] ein Tröpfchen Quecksilber an der nadelfeinen Spitze der Röhre […]n Vorschein kommt, worauf man die Kugel aus dem Feuer und die […]itze hineinbringt, wo sie schnell zuschmilzt, besonders wenn man das […]rohr anwendet; das Quecksilber zieht sich jetzt zurück und der Raum […]er demselben wird luftleer, worauf man durch weiteres Schmelzen […]s Ende der Röhre abrundet und, wenn das Thermometer auf eine […]che Skala von Holz oder Metall befestigt werden soll, etwas umbiegt, […]e Fig. 2879. Sollte nach dem Verschluß durch eine Luftblase sich […]r Quecksilberfaden trennen, so kann man das Thermometer an einem […]n langen Bindfaden im Kreise herumschwingen; durch die Centri[…]galkraft wird, wenn die Röhre nicht zu enge ist, das Quecksilber […]eder vereinigt und die kleine Luftblase kommt über dasselbe, wo sie […]hts schadet. Gelingt es auf diese Weise nicht, so gelingt es manch[…]al leichter, wenn man das Thermometer auf ein Brettchen befestigt […]d den unteren Rand des Brettchens wiederholt schwach gegen eine […]ischplatte stößt. Sehr enge Röhren müssen meistens wieder geöffnet […]rden.

Fig. 2879.

Fig. 2880.

R. A. Grosse in Ilmenau verwendet zur Füllung der Thermo[…]eter tiefdunkel gefärbtes Toluol, dessen Gefrierpunkt bei — 50° C. […]gt. (Z. 7, 193, 1894.)

Für sehr niedrige Temperaturen (bis — 170°) wird Petroläther […]utzt [1]).

Gewöhnliche „luftfreie“ Quecksilberthermometer sind höchstens von […]39° bis + 300° brauchbar.

Thermometer für hohe Temperaturen (bis 550°) werden aus Boro[…]likatglas (Jenaer Glas Nr. 59) mit Kohlensäure- oder Stickstofffüllung […]n mindestens 12 Atm. Druck hergestellt [2]).

Fr. C. G. Müller empfiehlt für Demonstrationszwecke große […]ermometer, deren Füllung aus schwarz gefärbter, konzentrierter […]hwefelsäure besteht. Die schwarze Färbung wird erzeugt durch Er[…]tzen der Schwefelsäure mit etwas Zucker. (Fig. 2880 K, 5,50.) Um […]s Thermometer zu füllen, füllt man es zunächst mit Wasser, treibt […]les durch Erhitzen wieder vollständig aus und läßt nun sofort […]chwefelsäure einsteigen. Die Länge des Instruments ist 500 mm, die innere Weite […]s Thermometerrohres 0,75 mm, der Durchmesser des Gefäßes 9 mm, die Länge […]selben 25 mm. Man kann solche Instrumente beziehen von der Thüringischen […]lasinstrumentenfabrik in Ilmenau zum Preise von 1,50 Mk. (ungefüllt).

e) Skalen. Am zweckmäßigsten ist es für den gewöhnlichen Gebrauch, die

---

[1]) Solche Thermometer (Kryometer) liefert C. Richter, Berlin NW., Thurmstr. 4.

[2]) Solche liefern Warmbrunn, Quilitz u. Co., Glasbläserei u. mech. Werkstatt, […]erlin NW. 40, Haidestr. 55 bis 57.

Skala auf Papier zu zeichnen, wozu man die Teilmaschine Fig. [illegible] kann¹).

Die Art der Befestigung solcher Papierskalen zeigen die Fig. [illegible]
Für manche Zwecke ist es wünschenswert, daß die Skala auf die [illegible]röhre selbst gezeichnet sei. Wollte man die Striche mit dem [illegible] so würde die Röhre dadurch gebrechlicher, und es gehört hierzu [illegible]; darum ätzt man die Skala besser durch Flußspatsäure; sie wird [illegible] gezeichnet und dann mittels des Stangenzirkels auf die auf Seite [illegible] Weise auf das Glas übergetragen und geätzt. Auf die erforderliche [illegible] der Röhre und die Korrektion des Thermometers auf das [illegible] (s. Kohlrausch, Prakt. Physik) kann hier nur hingewiesen werden.

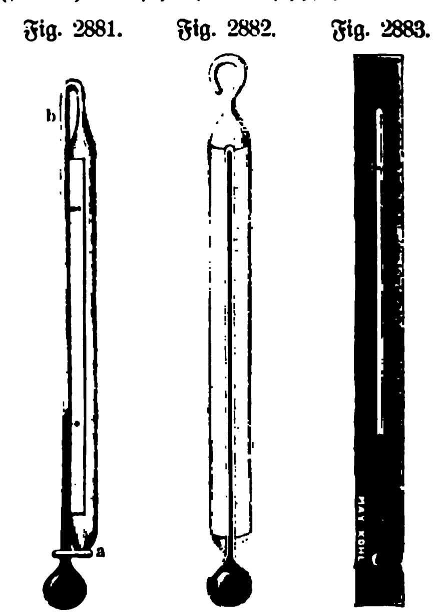


Fig. 2881. Fig. 2882. Fig. 2883.

Fig. 2883 (K, 2,25) [illegible] rauher Milchglasplatte befestigtes Thermometer dar, welches sich dazu [illegible] Herstellung der Skala im [illegible] zeigen, da sich auf die rauhe [illegible] Teilstriche leicht mit Bleistift [illegible] und auch wieder entfernen lassen.

Bei der Bestimmung des Siedepunkts muß der Luftdruck beobachtet werden, indem man die Siedepunkte der Thermometer auf 76 cm Barometerstand reduziert. Man müßte für diese Korrektion eine Tabelle haben über die Spannkraft der Wasserdämpfe bei verschiedenen Temperaturen. Allein da die Barometerstände nicht so sehr verschieden sind, so genügt es zu wissen, daß das Wasser bei 70,7 cm Barometerstand schon bei 98° C., bei 73,3 cm aber bei 99° C. kocht, indem man die zwischenliegenden Barometerstände den Temperaturen proportional nimmt. Wäre demnach der Barometerstand bei Bestimmung des Siedepunktes 72,5 cm gewesen, so würde an den gefundenen Siedepunkt nicht 100, sondern 98,7 zu stehen kommen, also auch der Zwischenraum zwischen diesem Punkte und dem Gefrierpunkte entsprechend geteilt werden.

Bei neuverfertigten Thermometern ändert sich noch die Größe des Gefäßes allmählich und es dauert sehr lange, bis dieselbe hinreichend konstant geworden.

Nach Welsh kann man die Thermometer künstlich alt machen dadurch, daß man sie längere Zeit in kochendes Wasser einhängt und dann langsam abkühlen läßt.

Thermometer, welche für höhere Temperatur gebraucht werden, müssen nach Crafts (1882) zehn Tage lang in siedendem Quecksilber erhitzt werden, bevor man sie graduiert.

Unter Empfindlichkeit des Thermometers versteht man die Verschiebung des Fadens bei Änderung der Temperatur um 1°. Sie kann vergrößert werden

¹) Feinere Thermometer erhalten Milchglasskala (Einschlußthermometer).

…ch Vergrößerung des Gefäßes oder Wahl einer engeren Röhre [1]). Letzteres ist …mäßiger, da große Flüssigkeitsmengen die Temperatur nur langsam annehmen. …besondere sind für Demonstrationszwecke, wobei die Schnelligkeit der Beobach… …g bei der Kürze der Zeit sehr wesentlich ist, Thermometer mit großen Gefäßen …t zu gebrauchen.

Beckmanns Thermometer sind oben mit einer Erweiterung versehen, um …ch Abbrennen eines Teils des Quecksilberfadens das Meßbereich ändern zu …men. (Fig. 2884 Hu, 37,50.)

Fahrenheit konstruierte Thermometer wie Fig. 2885, welche sowohl für …wöhnliche Temperaturen, wie auch in der Nähe des Siedepunkts brauchbar waren, …ne übermäßig lang zu sein. Auch heute wird noch öfters die mittlere Er… …eiterung aus ähnlichem Grunde angebracht.

f) Herausragender Faden. Nicht immer kann das Thermometer vollständig …n den Raum gebracht werden, dessen Temperatur bestimmt werden soll, es ragt …vielmehr ein mehr oder minder beträchtlicher Teil des Fadens aus demselben heraus. Ragen a Grade heraus, so ist der abgelesenen Temperatur der Wert $a^2(t - t')$ hinzuzufügen, wenn t' die tiefere Temperatur des herausragenden Fadens bedeutet [2]).

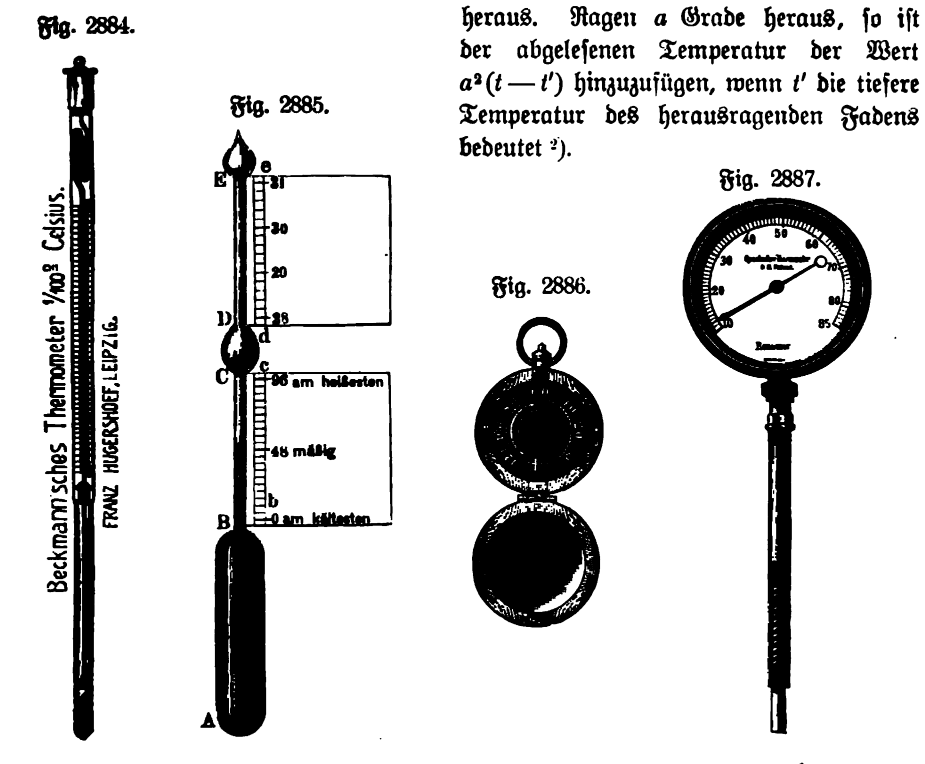


Fig. 2884. Fig. 2885. Fig. 2886. Fig. 2887.

g) Spezialthermometer. Für gewisse Zwecke sind Quecksilberthermometer mit Metallgefäß erforderlich. Ich stellte mir ein solches her aus einer etwa 5 mm weiten nahtlosen Stahlröhre, die an einem Ende durch einen eingeschliffenen

[1]) Thermometer mit sehr großem Gefäß, direkt in $1/_{100}$ Grade geteilt, liefern Dr. Siebert u. Kühn, Kassel. — [2]) Bezugsquellen für Thermometer sind: R. Fueß, Werkstatt f. wissenschaftl. Apparate in Steglitz bei Berlin, Düntherstr. 7 (große Normalthermometer zu 45 Mk.); A. Haak, Glastechn. u. mech. Werkst. in Jena (Thermometer von — 200° bis + 575°); ebenso W. Niehls, Glasinstrumentenfabrik, Berlin N., Schönhauserallee 171; Müller-Uri, Braunschweig (Taschenthermometer in Uhrkapseln nach Fig. 2886, Preis 3 Mk.);

und durch Überbrücken des Rohrrandes und Verkitten mit Emaille gedichteten Stah-
stöpsel geschlossen wurde, während das andere in gleicher Weise mit einem Stah-

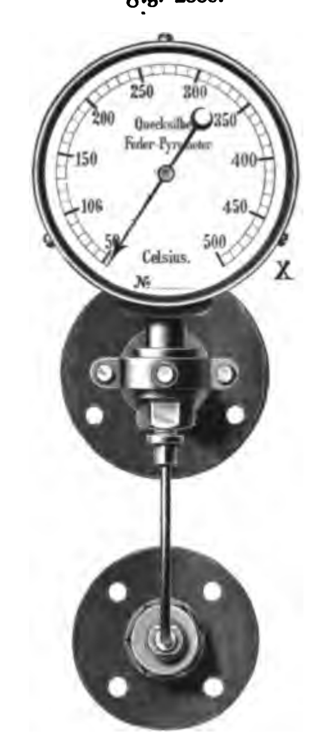


Fig. 2888.



Fig. 2889.



Fig. 2890.

stöpsel versehene Ende durch eine sehr dünne Platin-
kapillare mit der die Skala tragenden Glaskapillar
verbunden wurde. Mit dem Glas war diese Platin-
kapillare durch blaues Einschmelzglas verbunden, i
den Stahlstöpsel, welcher mit schlank konischer Bohrun
versehen war, fest eingetrieben, am Rande gegen ein
Versenkung der Bohrung angedrückt und außerdem m
Emaille von höherem Schmelzpunkte als die zur Dichtun
des Stopfens benutzte verkittet. Oben an die Glas-
kapillare war eine kleine Kugel angeschmolzen z
Füllung mit komprimiertem Stickstoff.

Zur Füllung wurde das Thermometer an d
Quecksilberluftpumpe angeschlossen, möglichst vollkomm
evakuiert und gleichzeitig in einem Quecksilberbade sta
erhitzt. Sodann wurde das Quecksilber unter Aufrechterhaltung des Vakuums hinein
destilliert, im Thermometer zum Kochen erhitzt, nun komprimierter Stickstoff ein

R. Burger, Glasinstrumentenfabrik, Berlin, Chausseestr. 2E; Kähler u. Martini
Fabrik chem.-bakteriologischer Apparate, Berlin W., Wilhelmstr. 50; Ch. F. Geißle
Sohn, Glasinstrumentenfabrik, Berlin N., Elsasserstr. 57; G. A. Schultze, Glasinstru-
mentenfabrik, Berlin SW., Schönebergerstr. 4; Heinz u. Co., Glasbläserei u. mech. Werk-
statt, Aachen, Vincenzstr. 15. Verschiedene Normal- und Spezialthermometer, insbesondere
auch solche aus geschmolzenem Quarz liefern Dr. Siebert u. Kühn in Kassel.

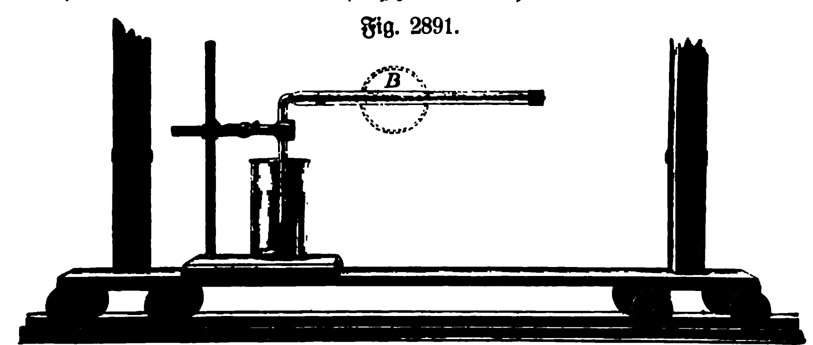
gelassen und nach der S. 492 beschriebenen Methode abgeschmolzen, so daß noch ein Teil der Rohrleitung mit der Kugel verbunden blieb. Nun erfolgte die Justierung der Länge des Quecksilberfadens durch Abstoßung eines Teils des Quecksilbers in jenes überflüssige Anhängsel, welches sodann ebenfalls unter Druck abgeschmolzen wurde [1]). (Vergl. Haid, Zeitschr. f. Instrum. **16**, 194, 1896.)

h) Die Anwendung großer Gefäße und Bestimmung der Druckänderungen mittels eines Federmanometers ermöglicht solche Metall-Quecksilberthermometer auch als Fernthermometer zu gebrauchen. (Fig. 2888 K, 85.) Dieselben können auch mit durch Uhrwerk betriebener Registriertrommel versehen werden (Fig. 2889).

i) Ausflußthermometer kann man objektiv darstellen, wenn man als Gefäß zum Auffaugen des Quecksilbers ein Glasnäpfchen nimmt, welches an dem Thermometer befestigt wird. (Fig. 2890 Lb, 15.) Ein besonderer Vorteil der Ausflußthermometer ist der, daß sie die höchste Temperatur an einem unzugänglichen Orte zu bestimmen gestatten, z. B. am Meeresboden. Man hat nur nötig sie nachher in kaltes Wasser zu bringen und dieses zu erwärmen bis das Quecksilber wieder bis zur Spitze reicht. Dann ist die Wassertemperatur die gesuchte Maximaltemperatur.

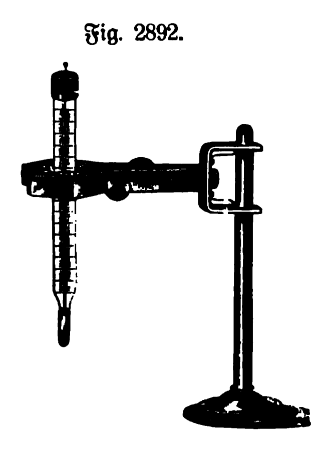
366. Projektionsthermometer. Warburg (Z. 9, 280, 1896) verwendet gebogene Thermometer, deren Skala projiziert wird [2]).

Fig. 2891.



Die Teilung reicht von — 22° bis + 110° und erlaubt Zehntelgrade zu schätzen. Bei größeren Temperaturänderungen, bei welchen das Gesichtsfeld nicht ausreichen würde, wird der ganze Apparat auf einen Wagen gesetzt, welcher sich auf horizontalen Schienen bewegen kann, wie Fig. 2891 zeigt.

Fig. 2892.



Sehr kleine Thermometer, deren Skalen sehr scharf auf planparallele Glasstreifen geätzt und mit umgekehrten Ziffern versehen sind, so daß sie beim Projizieren an die Wand in richtiger Stellung erscheinen, werden von Stöhrer in Leipzig verfertigt. Dieselben erscheinen recht wohl geeignet, manche geringe Temperaturänderungen, wie z. B. beim Lösen von Salzen in Wasser, beim Vermischen von Wasser und

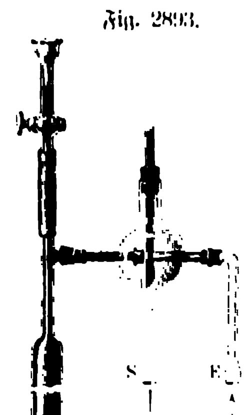
[1]) Stählerne Quecksilberthermometer nach Fig. 2887, Preis 70 bis 86 Mk., sind zu beziehen von C. Sonnenthal, Berlin C., Neue Promenade 6. — [2]) Zu beziehen von Carl Cramer in Freiburg i. B.

Schwefelsäure, beim Kristallisieren überschmolzener Salze aus übersättigten Lösungen u. s. w. einem größeren Auditorium vorzuführen. Sehr gut [illegible] auch, dazu dienen, die Konstanz der Temperatur beim Schmelzen und Sieden [illegible] demonstrieren (Fig. 2892 S, 6,50.)

367. **Das Thermometer-Barometer.** Da ein Galileisches Thermometer [illegible] Barometerstande und der Temperatur beeinflußt wird, ein gewöhnliches Thermometer aber nur von der Temperatur, so läßt sich durch Vergleichung der Angaben beider auf den Barometerstand schließen. Hierzu dient das „[illegible]“ von Hans und Hermary. Es besteht aus zwei parallel laufenden [illegible] gebrachten Thermometern, von denen das obere geschlossen und [illegible] gefüllt, das untere dagegen ein mit gefärbter Schwefelsäure (Indigo [illegible]) Guerickesches „Wasserbarometer“ ist. Damit die Schwefelsäure keine Feuchtigkeit aus der Atmosphäre anziehe, ist sie von dieser durch eine Schicht Öl abgeschlossen. Leppin u. Masche empfehlen das Instrument als sehr empfindlich und zuverlässig. (L., 21.)

368. **Thermoregulatoren.** Lemnares (1835) benutzte ein thermometerartiges, mit Wasser gefülltes Gefäß, in dessen Röhre ein Schwimmer aufstieg oder herabsank, je nachdem das Wasser sich ausdehnte oder zusammenzog. Durch den Schwimmer wurde eine Ofenklappe in Bewegung gesetzt. Schlösing (1870) füllt das ganz oben mit einer elastischen Membran verschlossene, thermometerartige Gefäß mit Flüssigkeit. Von der Röhre zweigt sich seitlich eine Trichterröhre mit Hahn ab. Letzterer bleibt zunächst geöffnet. Steigt die Temperatur, so daß sich die Flüssigkeit ausdehnt, so steigt sie in dem Trichterrohr. Ist die gewünschte Temperatur erreicht, so wird der Hahn geschlossen und nunmehr wird die Membran nach außen aufgebaucht. Ihr gegenüber steht nun aber das Ende eines Gaszuleitungsrohres E, Fig. 2893, und dieses sowie das durch die Membran verschlossene Ende des thermometerartigen Gefäßes sind umschlossen von einer weiteren Hülle, von welcher sich seitlich das Gasabflußrohr S abzweigt. Baucht sich nun die Membran sehr stark auf, so verschließt sie das Ende des Gaszuleitungsrohres, die Flamme des Brenners verkleinert sich, die Temperatur sinkt, die Membran zieht sich wieder zurück, der Gasfluß ist wieder freigegeben u. s. w. Bei späteren Instrumenten von Schlösing bildet das Trichterrohr die Fortsetzung des Thermometers und das Membranrohr zweigt sich unter rechtem Winkel seitlich ab. Ferner ist zwischen Membran und Ende des Gaszuleitungsrohres eine federnde Holzlamelle eingeschaltet, welche nicht ganz dicht an die Mündung des Rohres anschließt, so daß der Gaszufluß nie ganz vollständig unterbrochen werden und die Flamme verlöschen kann. (Fig. 2893 M, 10.)

Fig. 2893.



Reichert (1871) hat den in Fig. 2894 abgebildeten Apparat angegeben. Die Röhre des Thermometers C ist oben in den Cylinder D erweitert, in welchen das gebogene unten spitz auslaufende Glasrohr E eingeschmolzen ist. Das Gas wird durch den Schlauch A zugeführt und fließt durch B zu dem Brenner. Das Gefäß

es Thermometers C befindet sich in dem Raume, dessen Temperatur gleich erhalten werden soll. Wird er wärmer als er sein soll, so steigt das Quecksilber in den Raum D und verschließt die Öffnung von E mehr oder weniger. Damit aber bei gänzlichem Verschluß die Flamme nicht auslösche, so ist in E seitlich eine ganz feine Öffnung angebracht. Zur Regulierung dient die seitliche Röhre F, in welche eine feingängige Schraube S getrieben werden kann, wodurch man das Ende des Quecksilbers mehr oder weniger dem Ende von E nähern kann[1]).

Ähnliche Regulatoren konstruierten auch Carmichael (1874), Hannay, Page (1876), Roulin (1877), Fletscher (1876) und Randall. Letzterer be-

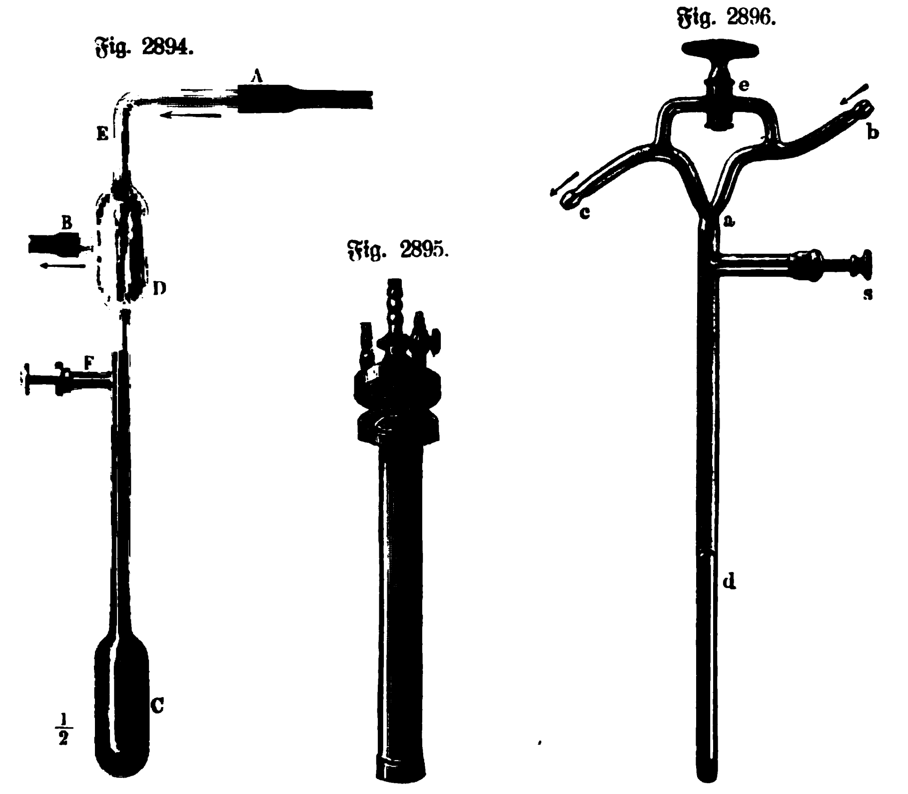


Fig. 2894. Fig. 2895. Fig. 2896.

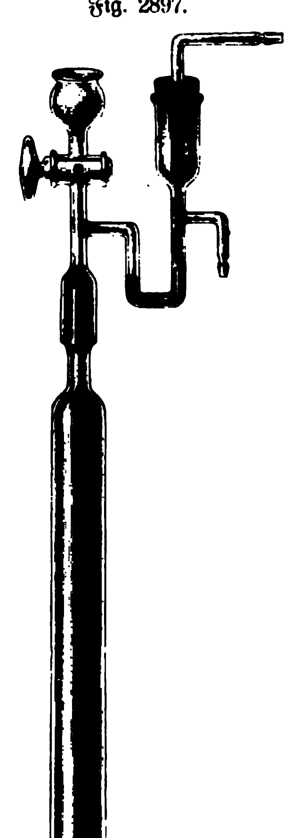
nutzt als Flüssigkeit Wasser und läßt dasselbe einen Kolben verschieben, an dessen Stange das Ventil der Gaszuleitung befestigt ist, derart, daß sich das Ventil beim Heben des Kolbens, d. h. bei Ausdehnung des Wassers, schließen muß[2]). Die übrigen unterscheiden sich von dem Reichertschen Regulator wesentlich nur durch die Form und Größe der einzelnen Teile[3]).

Eine prinzipiell wichtige Änderung bietet dagegen der Thermoregulator von

[1]) Zu beziehen von C. Kramer in Freiburg in Br. Preis 8 Mk. — [2]) Fig. 2895 zeigt einen metallischen Membranregulator durch Ausdehnung einer Flüssigkeit regulierend; zu beziehen von Dr. H. Rohrbeck, Berlin NW., Karlstraße 20a, zu 22,5 Mk. — [3]) Einen einfachen Thermoregulator nach Fig. 2896, welcher die Einhaltung aller Temperaturen mit einer Genauigkeit von ± 0,05° C. gestattet, liefert Muencke zu Berlin zu 9 Mk. Fig. 2897 zeigt einen Regulator nach Ostwald, zu beziehen von Dr. H. Rohrbeck in Berlin NW., Karlstr. 20a, zu 6 Mk. Er wird mit 10proz. Chlorcalciumlösung gefüllt und ist innerhalb $^1/_{10}$° empfindlich.

d'Arsonval (1880) (zu beziehen von B. Wiesnegg, Paris, rue Gay-Lussac 64). Bei diesem Thermostaten ist das Gefäß außerordentlich groß, es ist nämlich die im Innern hohle Wandung des Gefäßes, in welchem die Temperatur reguliert werden soll. Im übrigen ist der Regulator nach dem Schlösingschen Prinzip konstruiert; die sich ausdehnende Flüssigkeit wirkt auf eine Membran in einem mit Gaszufluß-rohr und Gasabflußrohr versehenen Gefäße, so daß bei zu hoher Temperatur ersteres abgesperrt wird. Durch diese Anordnung wird der Apparat sehr empfindlich[1]).

Fig. 2897.



Neesen (1882) hat sich bei Gelegenheit von Versuchen mit dem Bunsenschen Eiskalorimeter dieses Thermostaten bedient und denselben noch etwas modifiziert. Er läßt den Apparat ganz aus schlecht leitenden Stoffen herstellen und bewirkt die Erwärmung nicht direkt durch einen Brenner, sondern durch einen angesetzten Metallstab, der am freien Ende durch einen Brenner erhitzt wird.

Pontallié (1884) läßt den Regulator nicht in dem zu erhitzenden Gefäße erwärmen, sondern erhitzt ihn durch eine besondere kleine Flamme, die von dem Hauptbrenner abgezweigt wird.

Knudsen (1884) benutzt als Flüssigkeit bei niederen Temperaturen Alkohol, bei höheren Anilin. In einem Wasserbade von 22 cm Durchmesser und 16 cm Höhe erhielt er die Temperatur 45,5° während eines Monats auf 0,1° konstant. Die Abweichungen an verschiedenen Stellen des Bades gegen die Temperatur in der Mitte waren höchstens = 0,05°.

Einen wesentlichen Unterschied von den bis jetzt besprochenen weist der Thermoregulator von O. Nauman (1877) auf. Bei diesem wird das Thermometer als Ausflußthermometer mit sehr großem Gefäß gebildet. Letzteres besteht nämlich (ebenso wie das des eben erwähnten Regulators von d'Arsonval) aus der hohlen Wand des zu erhitzenden Gefäßes. Die Flüssigkeit ergießt sich durch einen Heber in ein seitliches Gefäß, welches an einem Hebel befestigt ist und infolge der Gewichtszunahme herabsinkt, doch nicht soweit, daß die Öffnung des Hebers außer Kontakt mit der Flüssigkeit käme. Sinkt die Temperatur wieder, so wird die vorher ausgeflossene Flüssigkeit durch den Heber wieder zurückgesaugt, der Hebel kehrt wieder in seine frühere Lage zurück. Durch die Bewegung des Hebels wird die Heizflamme größer und kleiner gestellt. Als Flüssigkeit für den Hauptkörper des Apparates dient Glycerin, der Heber dagegen taucht in Quecksilber.

369. **Maximum- und Minimumthermometer.** Zur Anfertigung des Quecksilber- sowohl als des Weingeistthermometers nimmt man weitere Röhren, als sie sonst zu Thermometern üblich sind, und zwar zum ersteren eine Röhre von etwa

[1]) Über einige Verbesserungen von d'Arsonvalschen Thermostaten siehe Zeitschr. f. Instrumentenkunde 10, 28, 1890.

$^1/_2$ bis $^2/_3$ mm, zum letzteren eine von 1 bis $1^1/_2$ mm Weite. Statt des Stahlstiftes dürfte beim Maximumthermometer (Fig. 2898 K, 15) ein hölzernes Stiftchen vorzuziehen sein, weil es vorkommt, daß die Stahlstifte nach längerer Zeit Adhäsion zum Quecksilber zeigen und dann natürlich ihre Dienste nicht mehr tun können. Der Glasstift im Weingeistthermometer (Fig. 2899 K, 15) besteht aus einer dünnen, schwarzen Glasröhre, die man an beiden Enden etwas aufbläst, oder vielmehr durch die eingeschlossene Luft auftreiben läßt und so richtet, daß sie in Weingeist nur noch langsam untersinkt. Fig. 2900 zeigt einen solchen Stift zweimal vergrößert.

Nach Lallemand kann man dadurch beide Rutherfordschen Thermometer in eins vereinigen, daß man die Röhre, wie in Fig. 2901, krümmt und über dem

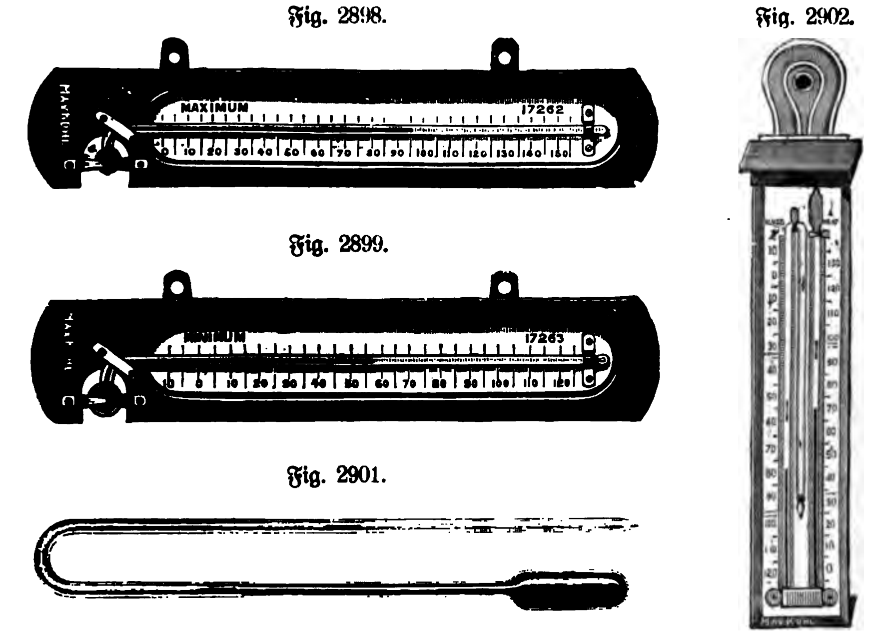


Fig. 2898. Fig. 2899. Fig. 2901. Fig. 2902.

Quecksilber gefärbten Weingeist anbringt, in welchem sich zwei Glasstifte als Schwimmer befinden. Der eine wird von dem Quecksilber vorgeschoben, bleibt bei dessen Rückgang liegen und gibt das Maximum an, der obere wird beim Sinken der Temperatur vom Weingeiste mitgenommen, bleibt beim Steigen liegen und gibt das Minimum an. Jede Skala muß wegen der Ausdehnung des Weingeistes für sich konstruiert werden.

Fig. 2900.

Das Maximum- und Minimumthermometer von Six-Capeller (Fig. 2902 K, 15) ist wesentlich einfacher und genauer als das vorige und läßt sich ohne Schaden transportieren, wofür bei dem vorigen nicht garantiert werden kann. Es ist ein einfaches Weingeistthermometer, dessen Weingeistfaden an einer Stelle durch einen kurzen Quecksilberfaden unterbrochen ist. Über und unter dem letzteren befinden sich eiserne Marken, welche mit geringer Reibung in dem Rohre haften und der Verschiebung des Quecksilberfadens entsprechend von diesem in die äußersten Lagen gebracht werden. Mittels eines Magneten lassen sie sich wieder zurückbringen. (M. 12 bis 18.)

Noch einfacher sind die Fieber-Thermometer für ärztliche Zwecke, bei welchen lediglich eine kleine Luftblase zwischen dem Quecksilber im Gefäß und dem

Quecksilberfaden bewirkt, daß der Quecksilberfaden bei Abkühlung abreißt und in seiner höchsten Stellung stehen bleibt, durch Schütteln bringt man ihn dann wieder in die Anfangsstellung.

370. Die Abhängigkeit der Gasabsorption von Flüssigkeiten von der Temperatur. Am einfachsten zeigt man dieselbe bei Wasser und Kohlensäure, indem man eine Sodawasserflasche erst in Eis abkühlt, das kalte kohlensäurehaltige Wasser in ein Becherglas eingießt und wartet, bis keine Gasblasen mehr erscheinen (eventuell Eis oder Schnee hinzufügt). Stellt man nun das Becherglas mit der klaren Lösung in klares (nicht kochendes) heißes Wasser (Projektion), so sieht man alsbald die Kohlensäure in Blasen entweichen.

Beispielsweise enthält 1 Liter Wasser bei 1 Atm. gesättigt in Gramm:

	Luft	Kohlensäure	Schweflige Säure	Ammoniak
bei 0°	0,032	3,5	288	800
bei 20°	0,022	1,8	113	500.

371. Dissoziation von Flüssigkeiten. Nach Michaelis und Schifferdecker zerfällt vierfach Chlorschwefel, SCl_4 (zu erhalten durch Sättigen von Schwefelsulfochlorid, S_2Cl_2, mit Chlor bei 22°) in $SCl_2 + Cl_2$. Bei weiterem Erwärmen zerfällt SCl_2 in S_2Cl_2 und Cl_2.

Fig. 2903.

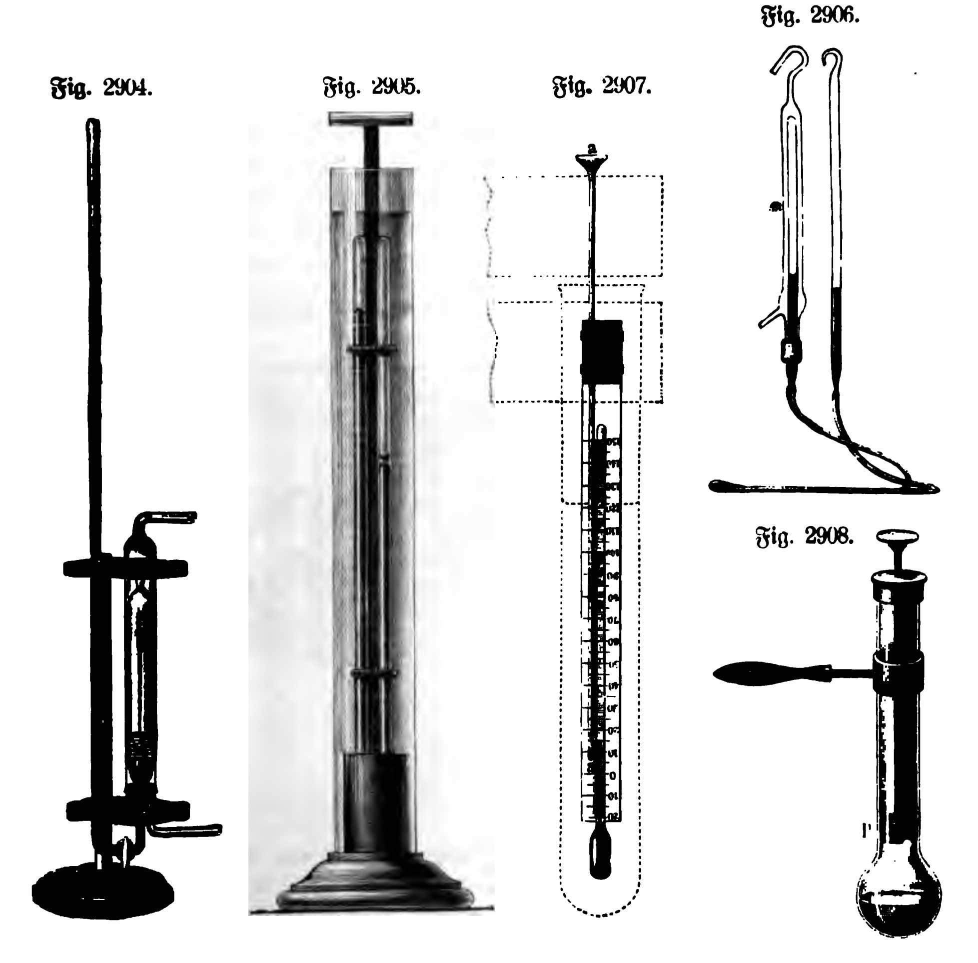
$\frac{1}{10}$

372. Abhängigkeit der Dampfspannung von der Temperatur. Um die Veränderung der Spannkraft des Alkohol- oder Ätherdampfes durch die Temperaturerhöhung zu zeigen, genügt es, bei dem Versuch § 314 ein erwärmtes Blech in die Nähe der Röhre zu bringen oder die Röhre mit der Flamme eines Bunsenbrenners zu bestreichen.

Um die Größe der Spannkraft des Wasserdampfes unter 100° C. zu bestimmen, kann man auch so verfahren, daß man ein Gefäßbarometer, wie Fig. 2903, dessen Gefäß etwas groß und in eine feine Spitze ausgezogen ist, fertig macht, sodann Wasser über das Quecksilber im Gefäße bringt und dieses so lange kocht, bis alle Luft ausgetrieben ist, worauf man die Spitze zuschmilzt. Die Differenz des Quecksilberstandes in der Röhre und im Gefäße gibt unmittelbar die Spannkraft des Wasserdampfes für die vorhandene Temperatur an. Ebenso kann man mit Äther verfahren, wobei man das Kochen des Äthers in heißem Wasser vornimmt; das Wasser darf indessen nur wenig heißer sein, als zum Kochen des Äthers nötig ist. Die Spitze des Gefäßes muß fein ausgezogen werden. Vor dem Zuschmelzen hebt man das Gefäß aus dem Wasser, damit das Kochen bald aufhört. Beim Zuschmelzen solcher Röhren ist es immer ein gutes Zeichen, wenn der innere Dampfdruck die zugeschmolzene Spitze etwas auftreibt; vollends fest verschmolzen wird die Spitze erst nach dem Erkalten. Die fertige Röhre wird wie ein Barometer auf einem Brettchen befestigt, auf welches eine Skala in Centimetern aufgetragen ist. Bei der Anfertigung hat man darauf zu sehen, daß das Gefäß alles Quecksilber fassen kann, ohne dadurch auf mehr als

zwei Drittel gefüllt zu werden; das Wasser muß nach dem Auskochen noch weniger als das übrige Dritteil betragen.

Nimmt man anstatt eines Barometers eine gleiche Röhre, wie Fig. 2903, die oben offen ist, und bringt Quecksilber hinein, auf dasselbe im Gefäß Wasser und kocht letzteres aus, so hat man nach dem Zuschmelzen des Gefäßes einen Apparat, durch den man die Spannung der Dämpfe über 100° C. bestimmen kann, so weit als die Höhe der Röhre dieses erlaubt. Man bringt dabei das Gefäß in ein Bad

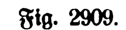

Fig. 2904. Fig. 2905. Fig. 2907. Fig. 2906. Fig. 2908.

von Quecksilber. Allerdings könnte man auch Öl und andere Flüssigkeiten anwenden, allein da die Röhre auf eine Skala befestigt werden muß, so könnte man dann für die Skala wenigstens kein Holz verwenden.

Andere Apparate, um die Zunahme der Dampftension mit der Temperatur zu zeigen, sind dargestellt in den Fig. 2904 (K, 23, Heizung durch Dampf), 2905 (E, 65, Barometer in Wasserbad), 2906 (Hu, 10, Barometer mit Dampfmantel) und 2907 (K, 11). Bei letzterem befindet sich die Flüssigkeit in der mit Trichter versehenen Kapillarröhre *aa* und der Dampfdruck wird kompensiert durch eine in die Röhre eingegossene Quecksilbersäule. Der Apparat ist für Projektion eingerichtet. Die Vorrichtung Fig. 2908 (E, 5) ermöglicht, den Dampfdruck durch

Auflegen von Gewichten auf einen beweglichen Kolben zu messen, allerdings nur ungenau.

Von mir konstruierte **Apparate**[1]) unterscheiden sich von dem Apparat Fig. 2903 hauptsächlich dadurch, daß, wie schon S. 1015 angedeutet wurde, das Quecksilber fortgelassen ist und der Druck im offenen Schenkel durch eine Luft- oder Kompressionspumpe reguliert und an einem beliebigen Manometer abgelesen wird. Er ist gleich dem Dampfdruck, wenn die Flüssigkeit in beiden Schenkeln gleich hoch steht. Die Luft kann, indem man einige Zeit den Druck etwas niedriger hält und durch einen Rückflußkühler dafür sorgt, daß der im offenen Schenkel gebildete Dampf sich wieder kondensiert und dahin zurückläuft, vollständig ausgetrieben werden, da sie mit den entweichenden Dampfblasen fortgeht und nicht mehr zurückkehren kann. Die Vorrichtung hat den Nachteil, daß, wenn nach Austreibung der Luft der Druck einmal so groß gemacht wird, daß sich aller Dampf verdichtet, die Flüssigkeit also bis zur Spitze der


Fig. 2909.

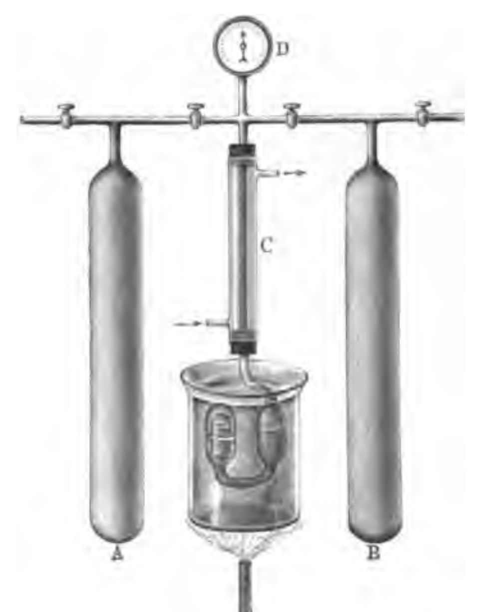
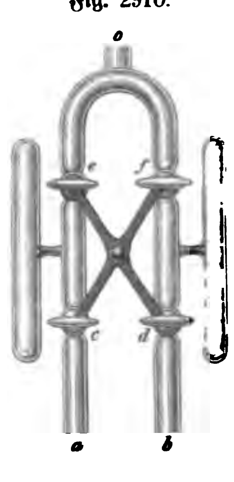


Fig. 2910.



Kapillare reicht, ein enormer Siedeverzug auftritt, und ein Versuch, diesen zu beseitigen, z. B. durch starkes Erhitzen der Spitze, häufig zu einer explosionsartigen Zertrümmerung des Gefäßes führt. Zweckmäßiger ist deshalb die Anordnung, wobei der kurze Schenkel in Form einer kleinen Glocke lose im Innern des langen steht. Man kann hier den Siedeverzug leicht durch Erschütterung des Apparates beseitigen. Allerdings sind auch hier Explosionen nicht ausgeschlossen. Ein Mangel ist der Umstand, daß die aus dem Rückflußkühler zurücktropfende kalte Flüssigkeit die Glocke treffen und hierdurch unkontrollierbare Änderungen der Temperatur veranlassen kann. Dem ließe sich durch eine Kombination beider Konstruktionsweisen vorbeugen. Die Änderung des Druckes geschieht am einfachsten mit Hilfe von Hähnen, durch welche sich der Apparat mit einem geräumigen Kessel mit verdichteter *A* oder ver

[1]) O. Lehmann, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 2, 77, 1882 und Molekularphysik 144 u. ff.

ünnter Luft *B* in Verbindung setzen läßt (Fig. 2909). Das Manometer *D* ist chematisch als Federmanometer angedeutet, wird aber zweckmäßiger als Flüssigkeits-nanometer oder Barometer ausgeführt. (Ich benutzte außer Quecksilber- und Wasser-nanometer auch solche mit Methylenjodid.) Der Rückflußkühler *C* muß möglichst ang sein, um keine Substanz zu verlieren. Zur feineren Regulierung des Druckes mpfiehlt sich, zwischen die Kessel *A* und *B* und den Apparat noch kleinere Behälter inzuschalten, am einfachsten solche aus Glas. Fig. 2910 zeigt eine Kombination on Hähnen mit Zwischenschaltung solcher Glasbehälter, sowie mit Federn zur Fest-altung der Hahnzapfen.

Die nachstehende Tabelle gibt das Gewicht des Wasserdampfs in Grammen ro cbm und seine Spannkraft in mm für die Temperaturen von — 20° bis + 40° n[1]). Annähernd sind beide gleich der Temperatur in Celsiusgraden, was nan sich leicht merken kann.

Temperatur des Taupunktes Grad	Entsprechende Spannkraft des Wasserdampfes mm	Gewicht des Wasserdampfes in 1 cbm g	Temperatur des Taupunktes Grad	Entsprechende Spannkraft des Wasserdampfes mm	Gewicht des Wasserdampfes in 1 cbm g
−20	1,3	1,5	19	16,3	16,2
−15	1,9	2,1	20	17,3	17,1
−10	2,6	2,9	21	18,3	18,1
− 5	3,7	4,0	22	19,4	19,1
0	5,0	5,4	23	20,6	20,2
1	5,4	5,7	24	21,8	21,3
2	5,7	6,1	25	23,1	22,5
3	6,1	6,5	26	24,4	23,8
4	6,5	6,9	27	25,9	25,1
5	6,9	7,3	28	27,4	26,4
6	7,4	7,7	29	29,0	27,9
7	7,9	8,2	30	30,6	29,4
8	8,4	8,7	31	32,4	31,0
9	8,9	9,2	32	34,3	32,6
10	9,5	9,7	33	36,2	34,3
11	10,1	10,3	34	38,3	36,2
12	10,7	10,9	35	40,4	38,1
13	11,4	11,6	36	42,7	40,2
14	12,1	12,2	37	45,0	42,2
15	12,8	13,0	38	47,6	44,4
16	13,6	13,7	39	50,1	46,7
17	14,5	14,5	40	53,0	49,2
18	15,4	15,3			

Folgende Tabelle gibt den Zusammenhang in weiteren Grenzen.

Druck (Atm.) . . .	1	2	3	4	6	8	10	15	20	25	30
Temperatur . . .	100	121	134	145	160	172	182	200	215	226	236

[1]) Eine genauere Tabelle siehe Kohlrauschs Handbuch der praktischen Physik, 9. Aufl., S. 582.

Die Zahlen gelten nach § 318 auch für den lufterfüllten Raum. Die graphische Darstellung der Tabellen, die Temperaturen als Abszissen, die Drucke als Ordinaten genommen, ergibt die **Dampftensionskurve**.

Die Spannkraft des Dampfes wächst, wie man sieht, in einem weit größeren Verhältnisse als die Temperatur, d. h. bei höheren Temperaturen bringt die gleiche Temperaturerhöhung eine weit größere Vermehrung der Spannkraft hervor als bei niedrigen; während eine Temperatur von 100 bis 121°, also um 21°, die Spannkraft des Wasserdampfes um 1 Atmosphäre vermehrt, wächst sie bei einer Temperaturerhöhung von 226 bis 236°, also bei einer Temperaturerhöhung von nur 10 Graden, schon um 5 Atmosphären; zwischen 226 und 236° reicht also ungefähr eine Temperaturerhöhung von 2° schon hin, um die Spannkraft des Wasserdampfes um 1 Atmosphäre zu steigern.

Die Zunahme der Spannkraft bei wachsender Temperatur hat zwei Ursachen. Denken wir uns irgend einen abgesperrten Raum mit gesättigtem, jedoch vollkommen trockenem Wasserdampf von 100° oder von 1 Atmosphäre Spannkraft erfüllt. Wird nun die Temperatur dieses Raumes auf 121° erhöht, so sucht der in ihm enthaltene Dampf allerdings sich auszudehnen; da er jedoch sich nicht ausdehnen kann, wird seine Spannkraft nach dem **Gay-Lussacschen** Gesetze wachsen, aber nur im Verhältnis der absoluten Temperaturen 373:394, und wird daher 1,06 Atmosphären betragen. Der Dampf ist nun nicht mehr gesättigt, es ist **überhitzter Dampf**, welcher sich ganz ebenso verhält wie ein Gas. Wenn sich aber noch Wasser in diesem Raume befindet, so wird sich infolge der Temperaturerhöhung eine neue Quantität Dampf bilden, bis die Spannkraft desselben 2 Atmosphären beträgt. Die Zunahme der Spannkraft des gesättigten Dampfes rührt also vorzugsweise daher, daß der Dampf dichter wird und infolge seiner größeren Dichtigkeit einen größeren Druck ausübt.

Nach Rebenstorff (Z. 17, 213, 1904) kann die Änderung des Dampfdruckes mit der Temperatur auch im lufterfüllten Raume gezeigt werden, indem man in zwei gleiche mit Manometern versehene Fläschen etwas Wasser bzw. Schwefelsäure bringt. Steigt die Temperatur, so steigt das Manometer an der Wasser enthaltenden Flasche höher.

Die folgende Tabelle enthält die Sättigungsdrucke einiger anderer Flüssigkeiten in mm:

Beobachtete Flüssigkeit	Temperatur				
	— 20°	0°	+ 20°	+ 60°	+ 100°
Alkohol	3,3	12,5	44,1	351	1690
Äther	66	185	440	1730	4900
Benzol	6	26	75	389	1342
Schwefelkohlenstoff	47	128	298	1160	3320

Es gibt Flüssigkeiten, deren Siedepunkt **unter** der mittleren Lufttemperatur liegt; solche Körper können natürlich unter gewöhnlichen Umständen nicht tropfbar flüssig sein, sie sind bei der gewöhnlichen Lufttemperatur unter dem gewöhnlichen Luftdrucke nur gasförmig, z. B. Ammoniak und schweflige Säure. Für diese beiden sind die Sättigungsdrucke in Atmosphären:

Beobachtete Flüssigkeit.	Temperatur				
	− 20°	0°	+ 20°	+ 60°	+ 100°
Ammoniak	1,8	4,2	8,4	26	61
Schweflige Säure	0,6	1,5	3,3	10,9	28

Hinzuweisen wäre auch auf die Spannung des Quecksilberdampfes und die dadurch bedingte Korrektion des Barometerstandes. Sie beträgt ungefähr ebensoviele Tausendstel Millimeter als die Temperatur Grade Celsius.

373. Dampfkochtöpfe. Der Papinsche Topf. Um die Zunahme der Siedehitze bis zum Drucke einiger Atmosphären zu zeigen, gibt man dem Topfe am besten die Form eines kleinen cylindrischen Dampfkessels von etwa 15 cm Weite und 3 bis 4 dm Länge, wozu Blech von 3 mm Dicke erforderlich ist, um ihn mit vollkommener Sicherheit auf 4 Atm. Überdruck gebrauchen zu können. Der Kessel muß

Fig. 2911.



Fig. 2912.



nebst dem Sicherheitsventile einen Probierhahn haben, um sich bei allenfallsigem anderen Gebrauche vom Wasserstande überzeugen zu können, der, wie immer, nicht unter die Feuerfläche sinken darf; sodann einen Dampfhahn und ein einschraubbares Thermometer. Das Thermometer muß so gerichtet werden, daß sein Siedepunkt

außerhalb des Kessels sich befindet, seine Skala braucht nur bis etwa 160° zu gehen, und kann allenfalls auch nur von fünf zu fünf Graden geteilt sein; es wird mit Mennigekitt in seiner Fassung befestigt [1]). (Fig. 2912 K, 95.)

Bei Fig. 2913 ist das Thermometer nicht zum Einschrauben, sondern es ist in den Deckel eine kurze eiserne Röhre geschraubt, in welche Quecksilber kommt, und in dieses steckt man ein Thermometer.

Deisinger (Z. 17, 163, 1904) benutzt einfach eine unten geschlossene Messingröhre von etwa 2½ cm Durchmesser und 20 cm Länge mit seitlichem Tubulus, in welchen ein Thermometer mittels Kork und Überfangschraube fest eingesetzt ist. Die Röhre wird mit Wasser gefüllt, erhitzt und gezeigt, daß das Thermometer nur bis

Fig. 2914.





Fig. 2913.

100° steigt. Sodann wird sie mit einem Kork verschlossen und abermals erhitzt. Die Temperatur steigt nun bedeutend über 100°, bis schließlich der Kork mit großem Knall an die Decke geschleudert wird, worauf das Thermometer sofort auf 100° zurückgeht.

Mit sehr wenig Zeitverlust und weithin sichtbar kann man den Zusammenhang zwischen Dampfdruck und Temperatur zeigen, wenn man einen großen eisernen Kessel, in welchen ein Luftthermoskop eingesetzt ist (vergl. Fig. 2749, S. 995), aus der Dampfleitung mit Dampf von 5 bis 10 Atm. Druck füllt und den Dampf dann nach und nach ausströmen läßt. Jedem Rückgang des am Kessel angebrachten Manometers entspricht ein Rückgang des Thermoskops.

---

[1]) Dampftöpfe aus zwei Teilen von starkem Kupfer mit aufgenieteter Flansche aufgesetzt, mit Manometer und Sicherheitsventil versehen, auf 15 Atm. geprüft, liefern Dr. Bender und Dr. Hobein, München, Gabelsbergerstr. 76 a, zu 90 Mk. Ein Modell eines Röhrendampfkessels nach Fig. 2911 liefert Max Kohl in Chemnitz zu 630 Mk.

Handliche, durch Gas heizbare, nicht zu schwere, leicht zu verschließende Digestoren, die dem erforderlichen Maximaldruck mehr als hinreichenden Widerstand leisten, werden in chemischen Laboratorien häufig gebraucht und sind in verschiedener Weise konstruiert. Ich gebe im folgenden die Beschreibung des in Fig. 2914 (M, 88 bis 200) dargestellten.

Der Kessel ist aus Kupfer gefertigt und hat je nach dem erforderlichen Druck eine Wandstärke von 3 bis 5 mm. Die Innenfläche ist blank; zum Schutz dient erforderlichenfalls ein Einsatz von Blei, Glas, Porzellan oder Ton, der mittels Glasplatte verschlossen werden kann. Der halbkugelförmige Deckel besteht bis zum Maximaldruck von 25 Atmosphären aus Messing oder Gußeisen, bei höherem Druck aus Phosphorbronze. Als Dichtungsring dient bis zu 25 Atmosphären ein Bleiring; bei höherem Druck dichten die Flächen des Kesselrandes gegen den Deckelrand durch kräftiges Anziehen der Bügelschraube. Unterhalb des verdickten Kesselrandes liegt der starke Ring von Phosphorbronze, der in den Lagern *m* die Angriffszapfen des starken Stahlbügels *B* trägt. In dem Deckel *D* eingeschraubt ist das Federmanometer *M* mit der U-förmig gekrümmten Röhre *d*, die, mit Glycerin gefüllt, verhindert, daß zerstörende Dämpfe in die Kapsel des Manometers gelangen können. Der Deckel *D* trägt ferner das Sicherheitsventil *r* mit dem Schiebergewicht *g*. Die Vorrichtung *n* vermittelt bei Destillationen die Verbindung mit dem Kühler, die durch die Ventilschraube *k* geschlossen werden kann. Letztere dient daher auch als Abblasevorrichtung. *T* nimmt das Thermometer auf, dessen Quecksilbergefäß entweder, um über den ganzen Raum des Kessels verfügen zu können, nur wenige Centimeter tief in dem Deckel oder anderenfalls tief im unteren Teile des Kessels sich befindet. Ein auf drei Füßen ruhender Mantel von durchlochtem Eisenblech dient dem Digestor als Träger und eine zweckmäßig konstruierte Gaslampe zur Erwärmung desselben.

Hierher gehören ferner die in chemischen Laboratorien sehr vielfach gebrauchten Röhrenöfen oder Explosionsöfen zum Erhitzen von Substanzen in zugeschmolzenen Glasröhren. (M, 28 bis 110.)

374. **Knallkugeln.** Will man die Gewalt, mit der sich der erhitzte Wasserdampf ausdehnt, zeigen, so macht man 4 bis 5 mm große Glaskügelchen mit einer etwa 1 cm langen Spitze [1]), füllt sie zur Hälfte mit Wasser (durch Erwärmen wie beim Füllen der Thermometer) und schmilzt die Spitze zu. Man kann sie schief in ein durch einen Schirm verdecktes Stearinlicht stecken und das Licht anzünden; in kurzer Zeit zerspringt die Kugel unter einem lauten Knall und löscht zugleich die Kerze aus.

Fig. 2915.

Größere erhitzt man über einem Bunsenbrenner und zwar zum Schutz gegen fortgeschleuderte Splitter in einem Käfig aus Drahtnetz.

375. **Der Pulshammer.** An eine Röhre von 1 bis 2 mm innerer Weite werden nacheinander zwei Kugeln angeblasen, worauf man die Röhre, wie Fig. 2916 zeigt, zweimal rechtwinklig biegt und das Ende der Röhre in eine Spitze auszieht. Die Kugel *a* samt der Röhre wird nun mit 70- bis 80 prozentigem Weingeist gefüllt, der durch Fernambuk rot gefärbt wurde, durch Kochen die übrige Luft ausgetrieben und die Spitze an der Kugel *b* zugeschmolzen; es soll nur etwa eine

[1]) Müller-Uri, Braunschweig, liefert die Kügelchen nach Fig. 2915 gefüllt.

halbe Kugel voll Weingeist übrig bleiben. Nimmt man nun die eine Kugel in die Hand, so daß die beiden Kugeln nach oben sehen und das Verbindungsstück horizontal steht, so wird der Weingeist unter lebhaftem Aufwallen in die andere Kugel getrieben, wobei man in der Hand eine bedeutende Abkühlung verspürt. (E, 0,75 bis 1,50.)

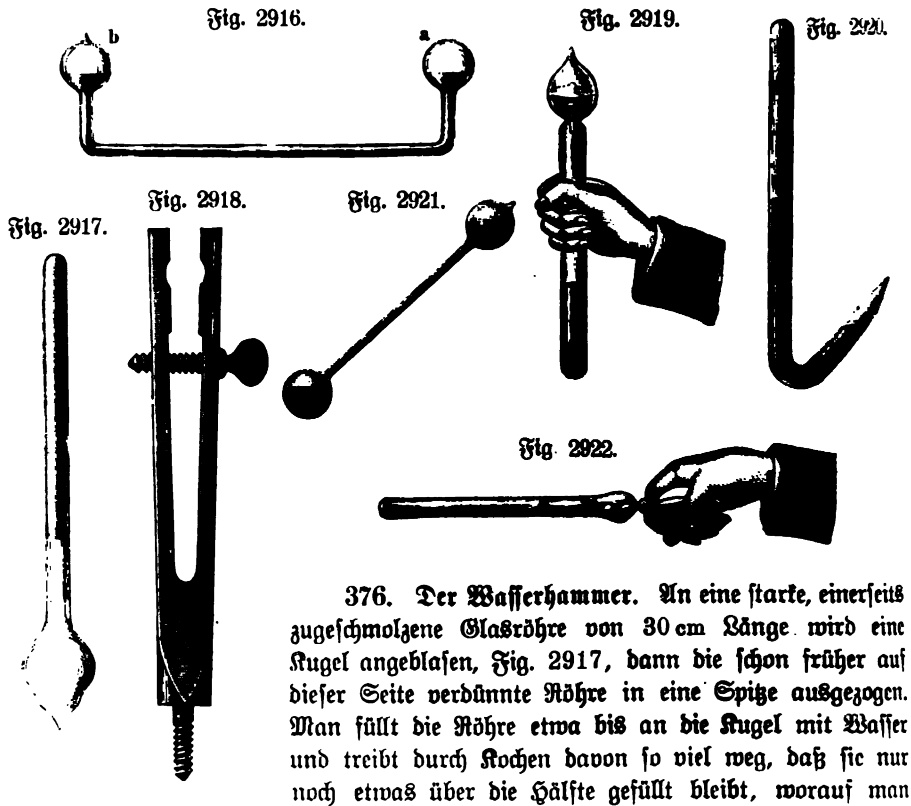


Fig. 2916. Fig. 2919. Fig. 2920. Fig. 2917. Fig. 2918. Fig. 2921. Fig. 2922.

376. **Der Wasserhammer.** An eine starke, einerseits zugeschmolzene Glasröhre von 30 cm Länge wird eine Kugel angeblasen, Fig. 2917, dann die schon früher auf dieser Seite verdünnte Röhre in eine Spitze ausgezogen. Man füllt die Röhre etwa bis an die Kugel mit Wasser und treibt durch Kochen davon so viel weg, daß sie nur noch etwas über die Hälfte gefüllt bleibt, worauf man noch während des Kochens die feine Spitze zuschmilzt. Da die Röhre sehr heiß wird, faßt man sie wie in ähnlichen Fällen am besten mit einer hölzernen Klemme, wie Fig. 2918. Ist die Röhre nun luftleer, so kocht das Wasser in ihr schon von der Handwärme, wenn man es in die Kugel bringt, und die Röhre in beinahe horizontaler Lage in die Hand nimmt. Kehrt man die Röhre rasch in die senkrechte Lage um, so daß das Wasser schnell in das andere Ende der Röhre fallen kann (Fig. 2917), so schlägt es wie Quecksilber in dem Barometer unter lautem Schalle an das Glas, ohne daß dieses aber springt, wenn die Röhre beim Zuschmelzen auf dieser Seite nicht geschwächt und gut verkühlt wurde. (E, 1,50 bis 3.)

Eine andere Form des Wasserhammers wurde bereits S. 1025 (§ 320) erwähnt. Läßt man bei dem Wasserhammer das Wasser in der Kugel hängen, während man das Rohr in der warmen Hand hält und stößt nun das Ende des letzteren leicht auf, so daß eine kleine Quantität Wasser austritt, so beginnt das Instrument zu singen, indem die aus der wärmeren Röhre in die Kugel aufsteigenden Dampfblasen dort sofort unter hellem Schall zusammenklatschen und verschwinden. Dieses Singen dauert so lange fort, als man die Röhre in der Hand hält und das Wasser in der Kugel durch die Kondensation des Dampfes noch nicht zu sehr erwärmt

ist [1]) (Fig. 2919 Lb, 2). Fig. 2922 Lb, 1,50 zeigt eine andere Art den Versuch auszuführen.

Zu erwähnen wären noch: Demonstration von Tafeln der Spannkraftkurven verschiedener Flüssigkeiten, die Abhängigkeit der Verdunstungsgeschwindigkeit oder der Flüchtigkeit von der Temperatur u. s. w.

377. **Dampfthermometer.** Pernet benutzt als Demonstrationsthermometer ein Kirchersches Thermoskop, gefüllt mit einer Flüssigkeit, deren Dampfspannung rasch mit der Temperatur zunimmt (z. B. gefärbtem Schwefeläther). Die Kugel dient zugleich als Manometergefäß, indem die Thermometerröhre bis nahe zum Boden in die Kugel hineinragt und dort in Quecksilber oder eine andere Sperrflüssigkeit eintaucht. Solche Thermometer sind sehr empfindlich, haben aber das Unangenehme, daß die Teilstriche der Skala ungleichen Abstand haben [2]).

Fig. 2924.

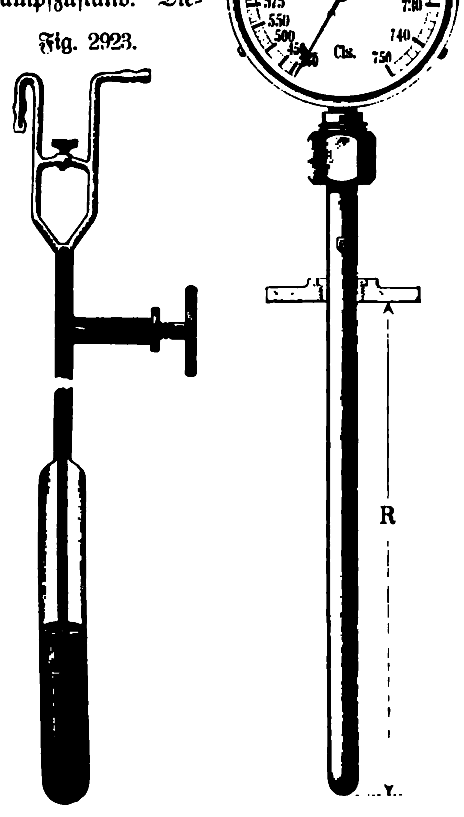


Fig. 2923.

378. **Temperaturregulatoren**, beruhend auf der Volumenzunahme beim Übergange in den Dampfzustand. Dieselben sind empfindlicher, als die früher besprochenen, auf der einfachen thermischen Ausdehnung gasförmiger oder flüssiger Körper beruhenden. Der Form nach gleichen sie etwa dem Regulator von Reichert (Fig. 2894). In das Gefäß wird eine kleine Quantität einer Flüssigkeit eingebracht, welche möglichst wenig unter der Temperatur siedet, die man herzustellen wünscht [3]).

Andreä (1878) empfiehlt für Temperaturen unter 110°: Äther, Äthylalkohol, Azeton, Petroleumäther und Wasser.

Lothar Meyer empfiehlt, eine ganze Serie solcher Regulatoren vorrätig zu halten (wobei dieselben in einem Gestell in Form der bekannten Reagenzgläsergestelle untergebracht werden können) und zwar gefüllt mit folgenden Flüssigkeiten:

a) Für Temperaturen unter 100°: Chloräthyl, Äther, Schwefelkohlenstoff, Gemische aus Äther und Alkohol, reiner Alkohol oder Benzol.

---

[1]) Die Fig. 2920 und 2921 zeigen andere Formen, zu beziehen von Müller-Uri in Braunschweig. — [2]) Stahlrohrfederthermometer (Thalpotasimeter, Fig. 2924 K,) durch Einwirkung des Drucks von Äther- oder Quecksilberdampf auf ein Federmanometer wirkend liefern Schäffer u. Budenberg in Magdeburg. — [3]) Fig. 2923 zeigt einen Thermoregulator nach Heidenreich; zu beziehen von Dr. H. Rohrbeck, Berlin NW., Karlstr. 20a, zu 15 Mk.

b) Für Temperaturen über 100°: Wasser, Toluol, Xylol oder Amylalkohol, Cumol oder Terpentinöl, Anilin oder Phenol, Naphthalin, Diphenyl oder Diphenylmethan, Diphenylamin und eventuell Anthracen. Die Regulatoren (mit Gebrauchsanweisung) können bezogen werden von R. Muencke (Preis 6 Mk.). Sie haben indes den Übelstand, daß sie leicht zerbrechlich sind, so daß empfohlen wird, dieselben mit einer Stahlhülse (M, 8,50) zu umgeben, welche beim Zerspringen das Quecksilber auffängt.

Fig. 2925.

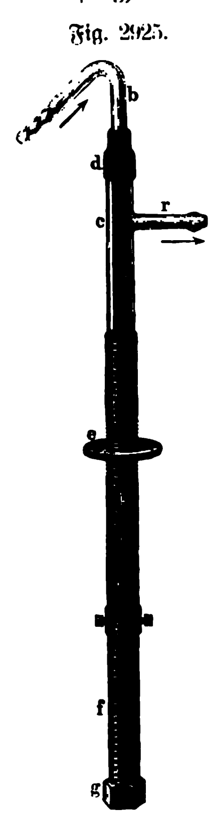
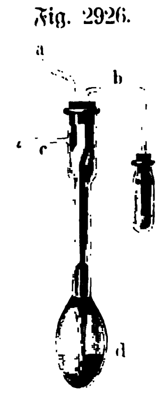


Fig. 2925 zeigt eine verbesserte Konstruktion von A. Fränkel, welche diesen Übelstand nicht besitzt.

Soxhlets Regulator (Fig. 2926 M, 9 bis 22) dient zur Erhaltung konstanter Temperaturen unterhalb der Lufttemperatur bis zu + 5° C., durch automatisch regulierten Zufluß von kaltem Wasser. Durch die Zuflußröhre *a* fließt kaltes Wasser aus einem mit konstantem Niveau versehenen Gefäß. Ist die Temperatur im Kaltwasserbade die normale, so fließt alles Kühlwasser durch den Becherheber *b*, welcher stets gefüllt bleibt, nach außen ab; steigt aber die Temperatur im Kaltwasserbade um 0,1° über die normale, so verschließt die steigende Quecksilbersäule das Heberende von *b* und das Kühlwasser fließt durch *c* in das Wasserbad, bis die Normaltemperatur wieder erreicht ist, die Quecksilbersäule also so weit gesunken ist, daß die Mündung des Heberrohres wieder geöffnet wird. Das Gefäß *d* wird mit Quecksilber und einigen Tropfen Äther oder einer anderen leicht siedenden Flüssigkeit gefüllt.

Fig. 2926.



R. Muenckes automatischer Sicherheits-Gashahn (1884). Auf einer eisernen, durch Schrauben befestigten Platte *a* (Fig. 2927), steht die Säule *b*, die nahe am Fuße die Verschraubung *cg* für die Gaszuleitung trägt und in den Gasdurchgangshahn *d* mit rechtwinkliger Bohrung endigt, welcher den Gaszutritt in die Röhre *f* vermittelt oder aufhebt. *h* ist die Verschraubung zum Anschlusse der Weiterleitung zu den Gaslampen, *e* der gebogene Arm mit dem Winkelhebel *vw* und dem Verbindungsstabe *u* mit der Hülse *t*. Eine stumpfwinklig gebogene Glasröhre *s* mit einerseits erweitertem Gefäß liegt in der Metallfassung *or* befestigt, welche, durch das leicht bewegliche Gelenk bei *m* mit der Säule verbunden, sich im labilen Gleichgewichte befindet; die Schrauben *n* begrenzen den Ausschlagswinkel nach rechts und links. Der am Hahnküken festsitzende, gebogene Hebelarm *z* endigt mit dem Gewichte *x*. Die Röhre *i* trägt den kleinen Hahn *k*, welcher die Einstellung des Sicherheitsflämmchens zuläßt. Dieses Flämmchen ist durch einen Glimmercylinder vor Luftzug geschützt.

Um den Apparat in Gang zu setzen, hebt man Röhre *s* aus den Fassungen *or* und *t*, bringt mittels Glasstab einen Tropfen Chloroform in dieselbe, gießt so viel Quecksilber nach, daß dasselbe in der Röhre *s* den in der Fig. 2927a schwarz gezeichneten Raum einnimmt, befestigt *s* in *o* und *t* und stellt die Schrauben *n* derart ein, daß die Röhre *s* nach rechts in die Lage der Fig. 2927a gebracht wird. Über

die Erweiterung von s, welche der Wärme von l direkt ausgesetzt ist, schiebt man einen entsprechend langen Drahtnetzcylinder. Man öffnet nun den Gashahn g durch Heben von x, entzündet l und erwärmt die Erweiterung der Röhre s so lange, bis durch das in den anderen Schenkel gedrückte Quecksilber derselben die Lage der Fig. 2927 b gegeben ist, legt x auf w und vermindert die Flammengröße durch Hahn k in l derart, daß das Quecksilber in der Röhre s eine feste Lage eingenommen hat. In der Stellung Fig. 2927 b ist diese Vorrichtung so hergerichtet, um die angeschlossenen Lampen in Tätigkeit zu setzen. So lange das Flämmchen l brennt, so lange brennen auch die Gaslampen; verlöscht dasselbe durch Schließen eines außerhalb liegenden Hauptgashahnes, so tritt nach kürzester Zeit das Quecksilber aus dem linken in den rechten Schenkel der Röhre s, das Gewicht x wird von w abgeworfen und mit dem Hahn d gleichzeitig die weitere Gaszuleitung abgeschlossen, die nur durch Wiederentzünden von l und Einstellen der Wippe s geöffnet werden kann.

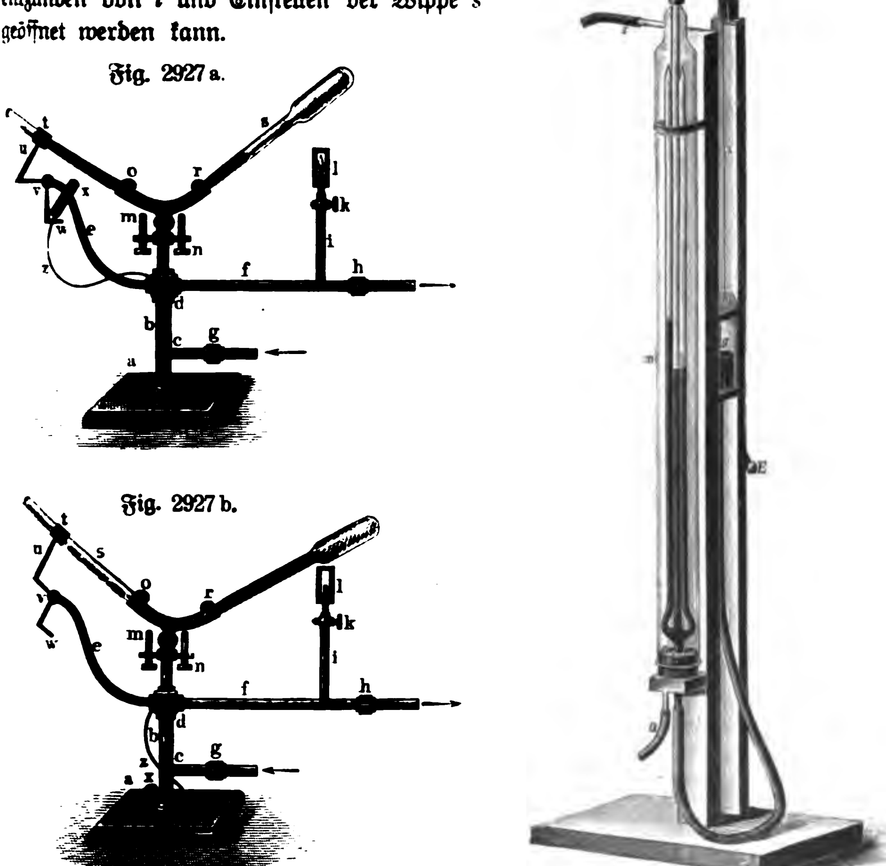

Fig. 2927 a.

Fig. 2927 b.

Fig. 2928.

379. Überhitzte Dämpfe. Verschwindet bei dem auf S. 1076 beschriebenen Versuche mit steigender Temperatur alle Flüssigkeit, so ist der Dampf ungesättigt oder überhitzt und folgt bei zunehmender Temperatur dem Gay-Lussacschen Gesetze, drückt also die Quecksilbersäule weniger stark herunter als der gesättigte Dampf, dessen Spannkraft mit der Temperatur rapid wächst. Um dieses verschiedene Verhalten zu zeigen, kann der Weinholdsche Apparat (Fig. 2928 Hu, 45) be-

nutzt werden, bei welchem zwei Barometer mit gemeinschaftlichem Gefäß gleichzeitig erhitzt werden.

380. **Sieden.** Mittels eines heizbaren Barometers, in welchem sich genügend viel Wasser befindet, kann man zeigen, daß die Dampfspannung bei 100° gleich dem

Fig. 2929.



Fig. 2931.

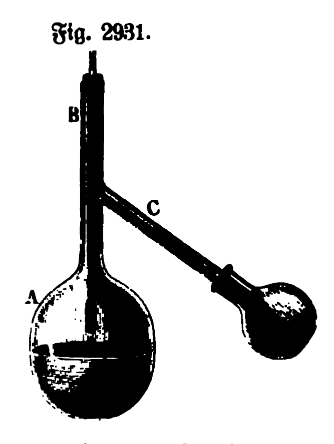


Fig. 2932.



Fig. 2930.



Atmosphärendruck wird und daß allgemein Siedetemperatur diejenige Temperatur ist, für welche Dampftension und äußerer Druck einander gleich sind; daß somit der Siedepunkt kein konstanter Punkt ist, sondern mit zunehmendem Drucke steigt und mit abnehmendem sinkt. Besonders leicht läßt sich letzteres demonstrieren, indem man erwärmtes Wasser unter den Recipienten der Luftpumpe bringt und so lange pumpt, bis Sieden eintritt, und dabei Temperatur und Druck beobachtet. Zweckmäßig benutzt man dabei zum Evakuieren eine Wasserluftpumpe, da die gewöhnliche Luftpumpe durch die entweichenden Wasserdämpfe verunreinigt würde.

Zur **Bestimmung des Siedepunktes** einer Flüssigkeit kann ein Kolben mit Thermometer (Fig. 2929), ein abgekürztes Barometer (Fig. 2930 Lb, 10) in einem geeigneten Bad eventuell mit Vorlage dienen (Fig. 2931 K, 18), oder bei Anwendung des Projektionsapparates der in Fig. 2932 gezeichnete Weinholdsche Apparat (K, 14,50).

Beispiele von Siedepunkten sind: Äther: 34,9°; Schwefelkohlenstoff: 46,8°; Brom: 47°; Alkohol: 78,4°.

Einige hochliegende Siedepunkte sind folgende: Anilin 184°, Naphthalin 218°, Benzophenon 306°, Quecksilber 357°, Schwefel 445°, Kadmium 756°, Zink 916°.

Einige niedrige: Schwefeldioxyd — 8°, Cyan — 21°, Ammoniak — 34°, Chlorwasserstoff — 35°, Chlor — 37°, Arsenwasserstoff — 55°, Schwefelwasserstoff — 62°, Kohlendioxyd — 78°, Phosphorwasserstoff — 85°, Stickoxydul — 88°, Äthylen — 103°, Xenon — 109°, Ozon — 125°, Krypton — 152°, Stickoxyd — 154°, Methan

— 164°, Sauerstoff — 183°, Fluor — 187°, Argon — 186°, Kohlenoxyd — 190°, Stickstoff — 195°, Wasserstoff — 252°[1]).

Die Zahlen bedeuten den normalen Siedepunkt, d. h. denjenigen bei 760 mm Barometerstand. Ein bei anderem Druck b beobachteter Siedepunkt kann annähernd auf 760 mm reduziert werden, wenn man $^3/_{80} \cdot (760-b)$ Grad hinzufügt.

Läßt man eine Flüssigkeit nacheinander unter verschiedenen Drucken sieden und bestimmt jeweils die Temperatur, so erhält man die Dampftensionskurve (Siedeverfahren). Zur Herstellung des konstanten Druckes dient ein größeres geschlossenes Gefäß mit Luftpumpe („künstliche Atmosphäre"):

Für Wasser entsprechen sich folgende Siedepunkte und Drucke (in mm):

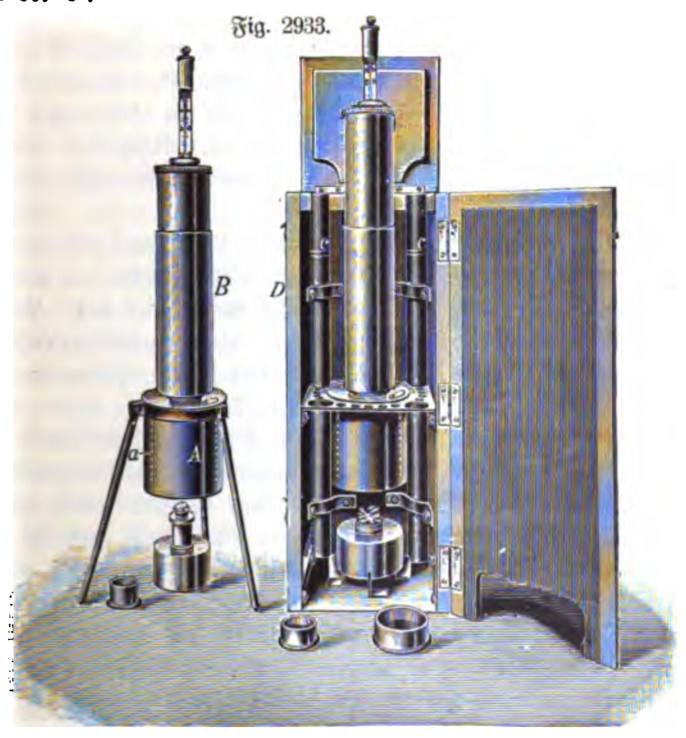
90°	91°	92°	93°	94°	95°	96°	97°	98°	99°	100°
525,9	546,2	567,1	588,7	611,0	634,0	657,7	682,1	707,3	733,2	760,0.

96,92°	96,32°	97,71°	98,11°	98,49°	98,88°	99,26°	99,63°	100°
680	690	700	710	720	730	740	750	760.

100,37°	100,73°	101,09°
770	780	790.

Bei einem Drucke von 30 mm ist die Siedetemperatur des Wassers 30°, weil bei dieser Temperatur die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes 30 mm beträgt. Unter einem Drucke von 10 mm siedet das Wasser bei 11°, unter einem Drucke von 5 mm bei 0°.

Fig. 2933.



381. Hypsothermometer oder Thermobarometer. Die Korrektion des Siedepunktes bei Herstellung der Skala eines gewöhnlichen Thermometers wurde schon

[1]) Über Sieden unter der Luftpumpe vgl. S. 1025.

auf S. 1068 besprochen. Hat man eine Tabelle oder graphische Darstellung, welche den Zusammenhang zwischen Siedetemperatur und Barometerstand gibt, so läßt sich mittels eines Thermometers, welches besonders Temperaturen in der Nähe von 100° mit Genauigkeit anzeigt, der Barometerstand bestimmen, was besonders für den Fall der Höhenbestimmung von Vorteil ist. Fig. 2933 (Lb, 90) und Fig. 2934 (K, 60) zeigen solche für bequemen Transport eingerichtete Hypsometer[1]). Da etwa $^1/_{25}$ Grad 1 mm entspricht, muß die Temperaturbestimmung mit großer Sorgfalt gemacht werden.

Fig. 2934.



382. **Siedeverzug.** Daß Flüssigkeiten unter günstigen Umständen eine über ihrem Siedepunkte liegende Temperatur ertragen, ohne zu sieden, kann man auf folgende Art zeigen. Man bringt mit Schwefelsäure angesäuertes Wasser in eine tubulierte Retorte, durch deren Tubulus ein Thermometer in die Flüssigkeit reicht, und kocht nun so lange, als sich noch Blasen an der Wand oder an einzelnen Stellen entwickeln, worauf man das Feuer entfernt und den Hals der Retorte mittels eines dickwandigen Gummischlauches mit einer tubulierten Flasche luftdicht verbindet, welche man schon vorher mit einer besonders stehenden Luftpumpe verbunden hat. Ist die Flüssigkeit bis auf 75° C. erkaltet, so fängt man an, langsam auszupumpen, bis das Quecksilber auch in der 15 bis 20 cm hohen Barometerprobe zu sinken beginnt; man kann nun rasch so weit verdünnen, als die Luftpumpe reicht, ohne daß die Flüssigkeit in der Retorte ins Sieden kommt. Erschüttert man aber die Retorte mäßig, so daß die Flüssigkeit an deren Wänden aufschwankt, so tritt plötzlich heftiges Sieden ein.

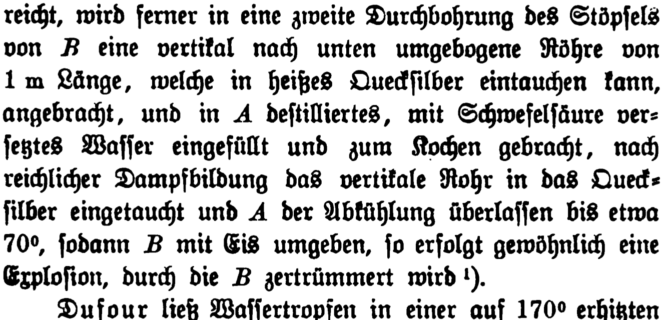
Krebs (1870?) empfiehlt eine Mischung von 1 Tl. Alkohol mit 3 Tln. Wasser, welche man in einem sehr sorgfältig gereinigten Kolben erhitzt, so lange, bis die Hauptmenge verdampft ist und aller Alkohol sich verflüchtigt hat. Dieses Wasser füllt man nun in eine Röhre aus möglichst knopf-, blasen- und streifenfreiem Glase, an welche eine Kugel angeblasen ist, die zuvor mit Schwefelsäure ausgekocht und mit destilliertem Wasser gespült wurde. Das Einfüllen geschieht durch einen kapillar ausgezogenen Fortsatz der Kugel, durch welchen man die Flüssigkeit durch abwechselndes Erhitzen und Abkühlen, ähnlich wie beim Füllen eines Thermometers, einsaugen läßt. Man füllt zunächst das Ganze vollständig mit Wasser, taucht dann die Kapillare in heißes Quecksilber, treibt wieder so viel Wasser aus, daß die Kugel halb leer wird, läßt etwas Quecksilber in dem Kapillarrohr aufsteigen und schmilzt letzteres dann ab. Hängt man den so erhaltenen Wasserhammer an einer Schnur in ein Öl- oder Paraffinbad, so kann man ihn oft bis 160° und mehr erhitzen, ohne daß das Wasser siedet. Bei höherer Temperatur treten einzelne Dampfblasen auf. Läßt man nun den Wasserhammer erkalten, bricht die Spitze der Kapillare ab und erhitzt nun von neuem, so kocht entweder das Wasser gar nicht mehr (selbst nicht bei 198°), sondern verdunstet nur langsam an der Oberfläche,

[1]) Solche Hypsothermometer liefern auch R. Fueß, Steglitz b. Berlin; G. Rösche u. Koch, Ilmenau i. Th. u. a.

bis es völlig verschwunden ist, oder es erfolgt eine Explosion, die das Gefäß zertrümmert. (Vorsicht!).

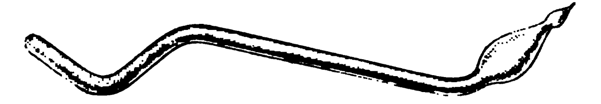
Werden zwei mit durchbohrten Korken versehene Kochflaschen A und B durch eine zweimal rechtwinklig gebogene Glasröhre verbunden, die in B bis zum Boden reicht, wird ferner in eine zweite Durchbohrung des Stöpsels von B eine vertikal nach unten umgebogene Röhre von 1 m Länge, welche in heißes Quecksilber eintauchen kann, angebracht, und in A destilliertes, mit Schwefelsäure versetztes Wasser eingefüllt und zum Kochen gebracht, nach reichlicher Dampfbildung das vertikale Rohr in das Quecksilber eingetaucht und A der Abkühlung überlassen bis etwa 70°, sodann B mit Eis umgeben, so erfolgt gewöhnlich eine Explosion, durch die B zertrümmert wird [1].

Fig. 2935.



Dufour ließ Wassertropfen in einer auf 170° erhitzten Mischung von Leinöl und Nelkenöl von gleichem spezifischen Gewicht schweben. Bei Berührung mit einem Draht explodierten sie. Ebenso kann man Chloroformtropfen in Chlorzinklösung zur Explosion bringen. Der Versuch läßt sich bei Anwendung eines Troges mit planparallelen Glaswänden objektiv machen (Vorsicht!).

Fig. 2936.



In einfachster Weise kann man den Siedeverzug demonstrieren, wenn man in einem großen Kolben längere Zeit reine verdünnte Natronlauge kochen läßt, bis heftiges Stoßen eintritt, und dann etwas Sand einwirft. Es erfolgt trotz der Abkühlung durch den Sand fast explosionsartiges Aufwallen.

Zu erwähnen wäre auch die Verhinderung des Siedeverzuges durch Einleiten von Luft, dagegen gehört die Aufhebung desselben durch Einleiten eines elektrischen Stromes zu Elektrolyse.

383. Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Nach dem Daltonschen Gesetz ist die Spannung des Wasserdampfes im lufterfüllten Raume nicht verschieden von der im Vakuum. Ein Kubikmeter Luft enthält, gleichgültig, welches ihre Dichte ist, ungefähr ebensoviel Gramm Wasserdampf als die Temperatur Grade Celsius beträgt [2], falls er vollständig mit Feuchtigkeit gesättigt ist, oder beispielsweise halbsoviel bei einer relativen Feuchtigkeit von 50 Proz. (Absolute Feuchtigkeit ist der tatsächliche Wassergehalt pro cbm, relative Feuchtigkeit das Verhältnis derselben zur absoluten Feuchtigkeit im Falle der Sättigung. Vgl. S. 1031, § 330.)

Hier wäre auch hinzuweisen auf die Erhöhung der Verdunstungsgeschwindigkeit durch Temperaturerhöhung; Trocknen feuchter Körper u. s. w.

Wir sagen: „die Luft ist trocken“, wenn das Wasser rasch verdunstet und

---

[1]) Einen Apparat zur Darstellung des Siedeverzuges nach Weinhold zeigt Fig. 2935 (I.b, 2,50), einen anderen Fig. 2936 (I.b, 3). — [2]) Vgl. § 372, S. 1079, Tabelle.

nasse Gegenstände durch dieses rasche Verdunsten schnell trocken werden; dagegen sagen wir: „*die Luft ist feucht*“, wenn solche Gegenstände an der Luft nur langsam oder gar nicht trocknen, oder wenn die geringste Temperaturerniedrigung feuchte Niederschläge bewirkt und etwas kältere Gegenstände sich mit Tau überziehen. Wir nennen also die Luft *trocken*, wenn ihre Temperatur weit vom Sättigungspunkte entfernt ist, *feucht* dagegen, wenn die Temperatur der Luft dem Taupunkte sehr nahe liegt; mit diesem Urteile über die Trockenheit oder Feuchtigkeit der Luft verbinden wir also durchaus kein Urteil über deren absoluten Wassergehalt. Wenn an einem heißen Sommertage bei einer Temperatur von 25° C. jedes Cubikmeter Luft 12 g Wasserdampf enthält, so sagen wir, die Luft sei sehr trocken; denn bei dieser Temperatur könnte jedes Cubikmeter Luft 22,75 g Wasserdampf enthalten, oder die Luft müßte noch unter 15° erkaltet werden, um bei unverändertem Wassergehalte gesättigt zu sein. Wenn dagegen im Winter bei einer Temperatur von + 4° jedes Cubikmeter Luft nur 6 g Wasserdampf enthält, so ist die Luft sehr feucht, weil die Luft für die herrschende Temperatur beinahe vollständig mit Wasserdampf gesättigt ist und die geringste Temperaturerniedrigung schon einen Niederschlag zur Folge hat.

In diesem Sinne können wir sagen, daß zur Zeit des Sonnenaufganges die Luft am feuchtesten ist, obgleich der absolute Wassergehalt geringer ist als zu jeder anderen Tageszeit.

Der absolute Wassergehalt der Luft ist wie die mittlere Lufttemperatur im Januar ein Minimum; er nimmt bis zum Juli zu, wo er sein Maximum erreicht, dann aber nimmt er wieder ab bis zum Ende des Jahres.

Fig. 2937.

Obgleich nun der Wassergehalt der Luft im Sommer größer ist als im Winter, so sagt man doch, die Luft sei im Sommer *trockener*, weil sie im Sommer durchschnittlich weiter von ihrem Sättigungspunkte entfernt ist. Die größte Trockenheit in dieser Jahreszeit besitzt die Luft gegen 3 Uhr nachmittags.

Ist die Luft warm und mit Feuchtigkeit gesättigt, so wird die Verdunstung der Feuchtigkeit in den Lungen beeinträchtigt, man empfindet ein drückendes Gefühl, die *Schwüle*.

Nach *Fleischer* soll in Wohnzimmern die relative Feuchtigkeit nie unter 40 Proz. und nie über 80 Proz. betragen.

384. **Differentialtensimeter.** Die durch Beimischung einer anderen Flüssigkeit, z. B. von Schwefelsäure zu Wasser oder durch Auflösen eines festen Körpers, z. B. Phosphorsäure, hervorgebrachte Dampfdruckerniedrigung bleibt auch in höherer Temperatur bestehen. Zum Nachweis dient der *Weinhold*sche Apparat Fig. 2928, S. 1087 oder das in Fig. 2937 dargestellte Differentialtensimeter (E, 40), wobei die Höhe der Röhren eventuell kleiner als Barometerhöhe sein kann.

Der Erniedrigung der Tension entspricht eine Erhöhung des Siedepunkts. Man kann also nach dieser das Mischungsverhältnis der beiden Flüssigkeiten beurteilen. *Ebullioskop* heißt ein Instrument, welches in solcher Weise speziell den Wassergehalt von verdünntem Alkohol zu ermitteln gestattet.

385. Gemeinschaftliches Sieden nicht mischbarer Flüssigkeiten. Nach Kundt zeigt man dies in folgender Weise. Ein großes Glasgefäß von etwa 30 cm Höhe und 22 cm Durchmesser füllt man mit Wasser von nicht ganz 46°. In dieses Wasser hält man ein halb mit Schwefelkohlenstoff gefülltes Reagenzgläschen hinein, bis der Schwefelkohlenstoff nahe 45° hat. Gießt man nun den letzteren in das Wasser hinein, so erfolgt heftiges Sieden. Hat dies nach einiger Zeit aufgehört, so kann man es vorübergehend nochmals hervorrufen, wenn man mit einem Glasstabe umrührt.

386. Kondensation von Dämpfen. Um den für die Kondensations-Dampfmaschinen wichtigen Satz zu zeigen, daß der Dampf in einem geschlossenen Raume stets die Spannung annimmt, welche dem kältesten Teile des Apparates entspricht, kann man folgenden Versuch machen. Man bläst an eine 90 cm lange Barometerröhre eine Kugel von etwa 3 cm Durchmesser, biegt die Röhre zweimal rechtwinklig und befestigt sie an irgend ein Stativ, wie Fig. 2938 zeigt. In die Kugel bringt man entweder durch Erwärmung, oder, wenn die Röhre etwas weiter ist, selbst durch einen kleinen Trichter Schwefeläther. Im letzteren Falle geschieht dieses vor der Befestigung an das Stativ. Durch eine Weingeistlampe oder ein Gefäß mit heißem Wasser wird der Äther bis zum Kochen gebracht, und so lange im Kochen erhalten, bis man annehmen kann, es sei alle Luft aus der Kugel und der Röhre ausgetrieben; wenn die Kugel halb voll Äther war, so darf man wohl etwa die Hälfte davon rasch verdampfen. Noch während des letzten Aufkochens des Äthers steckt man die Röhre in ein Glas mit womöglich ausgekochtem und noch warmem Quecksilber. Beim Erkalten steigt allmählich das Quecksilber in der Barometerröhre und erreicht die der Lufttemperatur entsprechende Höhe, wobei sich auf demselben etwas Äther ansammelt, besonders wenn man kaltes Quecksilber anwendet. Steigt das Quecksilber nicht mehr, so taucht man die Kugel in ein Glas Wasser, das durch Eis auf 0° erkaltet ist; sogleich steigt das Quecksilber in der Röhre und erreicht ziemlich bald die dieser neuen Temperatur entsprechende Höhe, obgleich nur die Kugel und nicht die Röhre erkaltet wurde; hierbei verdampft dann der Äther auf dem Quecksilber. Wendet man unausgekochtes Quecksilber an, so steigen aus demselben besonders beim Erkalten Luftblasen auf; es stören diese zwar das Hauptresultat nicht, nur erhält man dann keinen so hohen Stand des Quecksilbers in der Röhre, als er eigentlich sein sollte[1]).

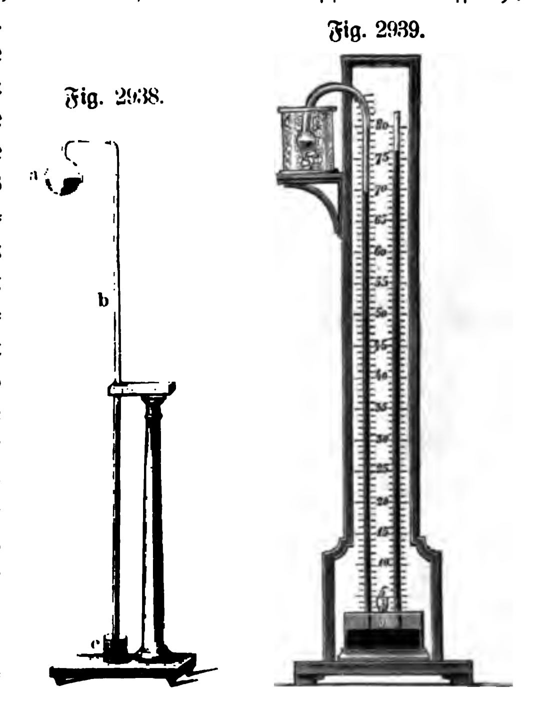


Fig. 2938. Fig. 2939.

[1]) Einen Apparat zu gleichem Zwecke nach Fig. 2939 liefern Leybolds Nachf. in Köln zu 40 Mk.

Meistens wird dieser Versuch so angestellt, daß man, wie in Fig. 2940, zwei Gläschen verwendet, von etwa 30 bis 50 ccm Inhalt, den Äther in beiden ins Kochen bringt und dann, wenn alles die Lufttemperatur angenommen hat, das eine Gläschen erkaltet. Der Apparat wird bei *c* an dem Arme irgend eines Statives befestigt.

Hammerl (Z. 9, 183, 1896) gibt dem Apparate die in Fig. 2941 dargestellte Form. Die Gefäße G_1 und G_2, welche durch eine möglichst weite Röhre *Ab* miteinander verbunden sind, werden durch *c* mit etwas Schwefeläther gefüllt und in die Bechergläser A_1 und A_2 mit heißem Wasser gestellt, die Röhre *R* angesetzt und nachdem die Luft durch das Verdampfen des Äthers ausgetrieben, das eine Becherglas entleert und mit eiskaltem Wasser gefüllt. Das Quecksilber aus dem Gefäß *m*

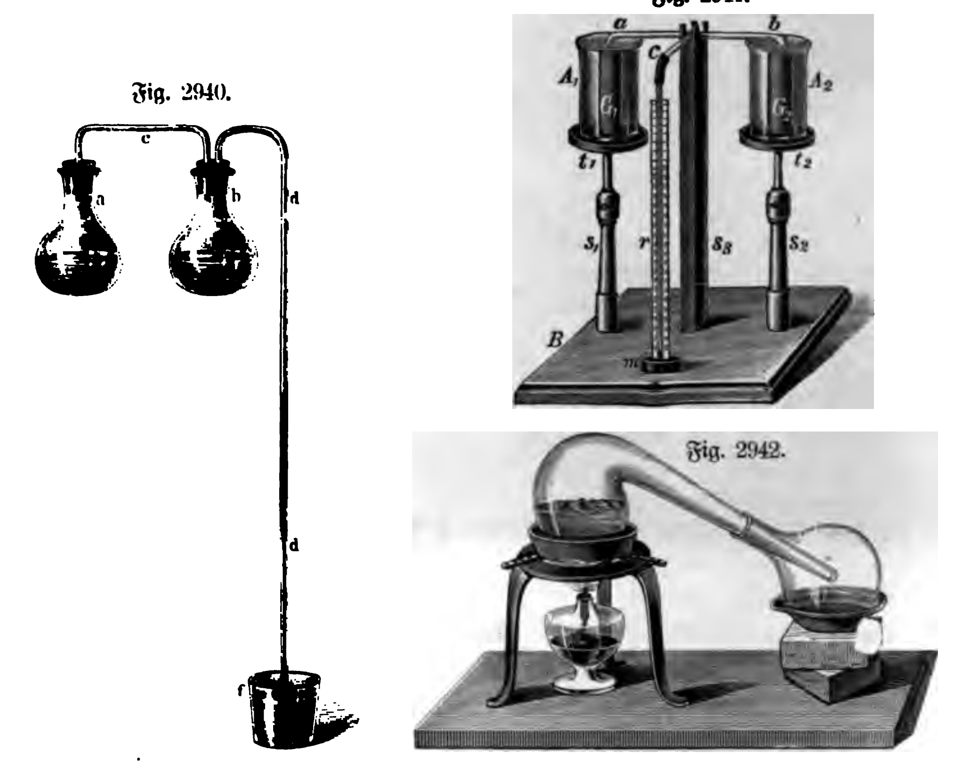


Fig. 2940.

Fig. 2941.

Fig. 2942.

steigt dann in *r* auf und zeigt, nachdem die Destillation aufgehört hat, d. h. aller flüssige Äther aus dem heißen Gefäße geschwunden ist, die Tension bei 0° an.

Weiter können Erwähnung finden: Die einfache Vorlage Fig. 2942 u. 2943 (K, 10), Liebigs Kühler (Fig. 2944 E, 20), der Schlangenkühler[1]) (Fig. 2945 Hu, 20), der Rückflußkühler (Fig. 2946, 2947, 2948, 2949 Hu, 3 bis 5) und die Apparate für Quecksilberdestillation (vgl. S. 581 ff.).

Zu erwähnen wäre auch die fraktionierte Destillation (Fig. 2950 Hu, 17,50), sowie die Verwendung der Destillation bei Extraktionsapparaten.

---

[1]) Große Kühlschlangen (für chemische Fabriken) sind zu beziehen von den Halleschen Röhrenwerken in Halle a. S.

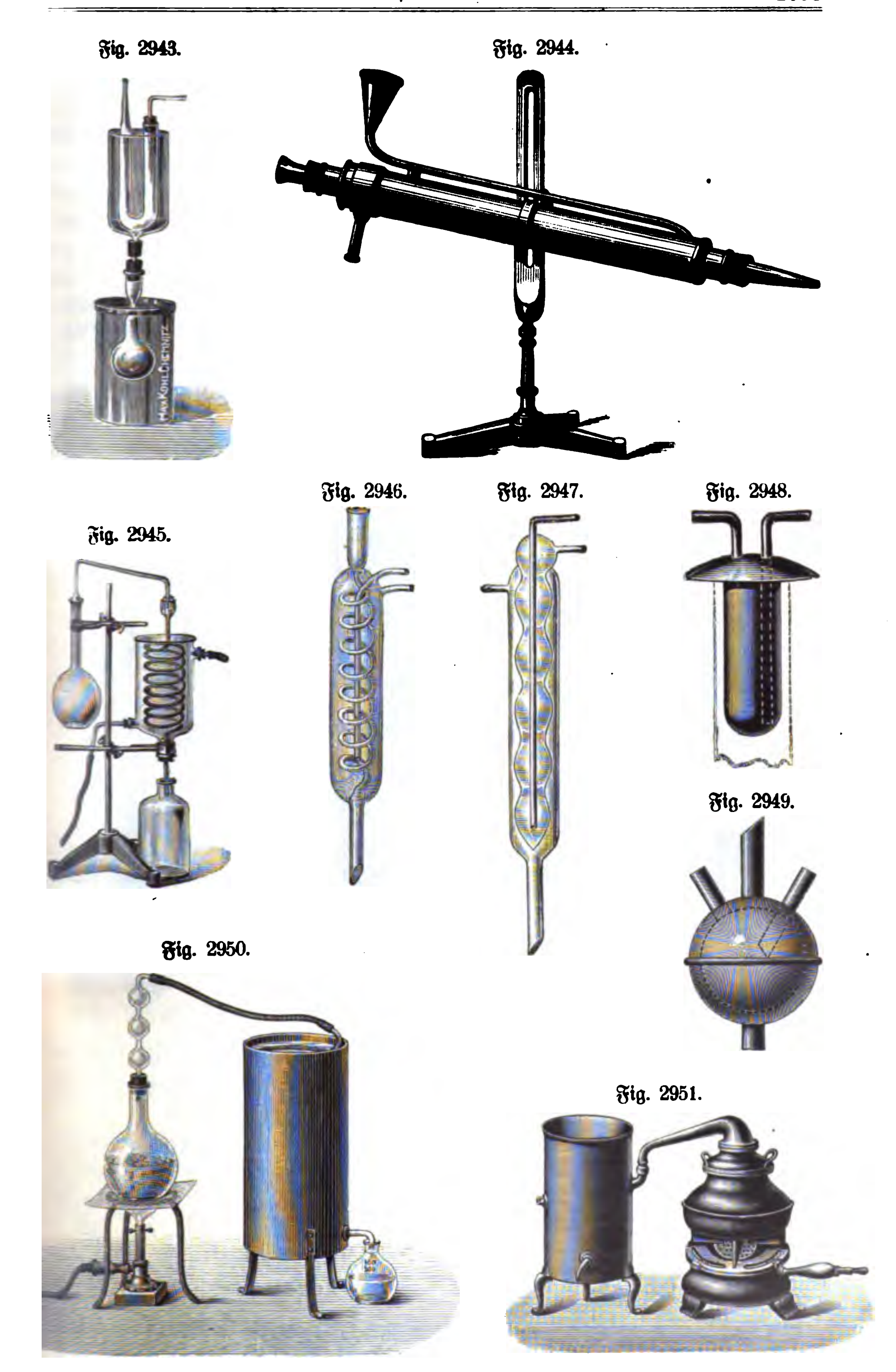


Fig. 2943.

Fig. 2944.

Fig. 2945.

Fig. 2946.

Fig. 2947.

Fig. 2948.

Fig. 2949.

Fig. 2950.

Fig. 2951.

Einen gewöhnlichen Destillierapparat für Wasser zeigt die Fig. 2951 (Hu, 60), einen mit der Wasserluftpumpe zu verbindenden Vakuumdestillierapparat Fig. 2952 (K, 230)[1]).

Die Kondensation des Wasserdampfs bei Temperaturerniedrigung kann auch dazu dienen, feuchte Luft oder andere Gase zu **trocknen**. Über hierzu geeignete Kondensationsgefäße nach **Moissan** siehe Deutsche Mechanikerzeitung 1904, S. 47.

Fig. 2952.



Fig. 2953.



387. **Sieden durch Abkühlung.** In einem geschlossenen Gefäße kann eine Flüssigkeit durch Abkühlung zum Sieden gebracht werden, wenn dadurch infolge von Kondensation des Dampfes genügende Druckverminderung herbeigeführt wird. Man kann dies auf die in Fig. 2953 dargestellte Weise zeigen. *a* ist eine gewöhnliche Vorlage (Kolben) mit langem Halse, dessen Rand man an der Lampe abrundet und ein wenig erweitert. Ein gut schließender Pfropfen wird zu dem Halse ausgesucht und dann der Kolben etwas mehr als zur Hälfte mit Wasser gefüllt, das man in heftiges Sieden versetzt; wenn man glaubt, alle Luft ausgetrieben zu haben, faßt man den Hals des Kolbens mit einem Tuche, nimmt den Kolben vom Feuer und

[1]) Über das Verdampfen und Sieden der Metalle im Vakuum siehe **Krafft** (Ber. d. d. chem. Ges. 36, 1690, 1903).

: denselben schnell. Wenn der Kolben gut luftleer war, so kocht nun das noch lange, und wenn es zu kochen aufgehört hat, darf man den Kolben ukehren und kaltes Wasser darauf gießen, wie die Figur zeigt, um es wieder lem Aufwallen zu bringen. Will man den Apparat später wieder gebrauchen, ı er vorher in kochendem Wasser erwärmt. Statt den Kolben zu verkorken, ıan ihn auch in eine Spitze ausziehen und diese nach hinlänglichem Kochen lzen. Hierbei muß man aber sehr langsam kochen, weil durch die enge bie Dämpfe nicht so rasch entweichen können; man setzt dafür das Kochen 0 Minuten lang fort. Die Arbeit wird auf dem Blastische gemacht, dessen e bereits im Gange sein muß, wenn man den Kolben von dem Kochfeuer , um die Spitze zuzuschmelzen.

an kann den Versuch auch so anstellen, daß man den Kolben wie in 54 verkehrt in den Ring eines Retortengestelles hängt, so daß er mit seinem ffenen Halse in ein Gefäß mit heißem Wasser taucht, welches wieder in einer n leeren Schüssel steht. So oft nun kaltes Wasser auf den Kolben gegossen wird, z. B. mittels einer an die Wasserleitung angesetzten Gießkannenbrause, entsteht in ihm starkes Aufkochen.

Fig. 2954.



Fig. 2955.



8. **Dunst, Nebel, Regen.** Nach Errera (Prometheus 8, 12, 1897) läßt Alkoholregen in einem etwa 20 cm hohen und 10 cm weiten Becherglas er- indem man es zur Hälfte mit Alkohol von 92 Proz. füllt, sodann mit einer ınschale bedeckt, auf dem Wasserbade langsam bis nahezu zum Sieden erhitzt, vorsichtig auf einen Holztisch stellt und erkalten läßt. Infolge des Eins staubhaltiger Luft bilden sich, wie Fig. 2955 zeigt, deutlich sichtbare Wölkchen, sich zu zahllosen Regentröpfchen verdichten, die senkrecht in die Flüssigkeit r fallen. Dieser Regen kann beinahe $^{1}/_{2}$ Stunde anhalten.

9. **Kondensationsverzüge** (Überhitzung). Um die Entwickelung von reich- Dunst beim Eintritt von Staub in einen Dampfstrahl zu zeigen, läßt n Dampf durch eine mittels untergesetzter Brenner erhitzte Messingröhre aus- :, so daß er dieselbe in überhitztem Zustande verläßt. Bringt man nun

glimmenden Zunder in die Nähe, oder bläst mittels eines Blasebalges, in dessen Ausströmungsröhre eine brennende Zigarette eingesetzt ist, Rauch hinein, so bilden sich alsbald von der betreffenden Stelle an dichte Dunstmassen, welche insbesondere bei Beleuchtung mit elektrischem Lichte deutlich hervortreten.

Fig. 2956.

Zu erwähnen wären hier auch die bereits S. 1034 besprochenen Hauchfiguren, welche auf verschiedenartiger Kondensation des Dampfes an Stellen mit kondensierter Gasschicht und ohne solche beruhen.

390. Bestimmung der Dampfdichte. Fast ausschließlich gebraucht wird der Apparat von Victor Meyer (Fig. 2956), bestehend aus einer thermometerartigen Glasröhre von 90 cm Länge, welche oben zur Aufnahme eines Stopfens trichterförmig erweitert ist und seitlich eine Ansatzröhre trägt, welche in einer kleinen pneumatischen Wanne mündet. Die zu verdampfende abgewogene Substanz befindet sich in einem kleinen Fläschchen, welches an der Unterseite des Stopfens durch einen Haken aus Draht oder dergleichen gehalten wird. Man erwärmt das Gefäß auf eine Temperatur, die höher liegt als die Verdampfungstemperatur der betreffenden Substanz, und läßt dann, sobald keine Gasblasen mehr in der pneumatischen Wanne aufsteigen, das Fläschchen durch Umdrehen des Hakens herunterfallen. Die Substanz verdampft in dem heißen Gefäße und der Dampf verdrängt eine gleiche Menge Luft, die in der pneumatischen Wanne aufgefangen und gemessen wird. Damit das Gefäß beim Herunterfallen des Fläschchens nicht zerschlagen wird, bringt man auf den Boden desselben etwas Quecksilber, Glaswolle oder dergleichen, um den Stoß zu mildern.

$\frac{1}{10}$

Der Apparat wird geliefert vom Mechaniker Bühler in Tübingen zu 4 Mk. (ohne Nebenapparate). Komplet mit Heizvorrichtung 25,20 Mk.

Die Erhitzung kann vorgenommen werden entweder in einem Luftbad oder in einem Dampfbad von Wasser, Anilin (184°) oder Schwefel (445°), oder auch in geschmolzenem Paraffin (bis über 300°), Salpetergemisch (230 bis 600°), Blei (über 330°) u. s. w. An Stelle des Fläschchens kann man auch ein ganz mit der Flüssigkeit gefülltes Glaskügelchen benutzen, welches durch die thermische Ausdehnung derselben gesprengt wird. Anstatt das Fläschchen durch Lüften des Stöpsels einzubringen, kann man es auf den Haken Fig. 2957 a auflegen und durch Zurückziehen desselben herunterfallen lassen, oder auch in den Schlauch Fig. 2957 b, wobei durch Heben desselben das Herabfallen bewirkt wird. Beispielsweise war bei Anwendung von 0,3 *g* Benzol das reduzierte verdrängte Luftvolumen = 80 ccm, also die Dampfdichte

Fig. 2957.

$$\text{dichte} = \frac{\text{Dampfgewicht}}{\text{Gewicht der verdrängten Luft}} = \frac{0{,}3}{80 . 0{,}0012} = 3{,}1.$$

Ist allgemein m das Gewicht der eingebrachten Substanz in Grammen, v das gemessene Luftvolum in ccm, t die Zimmertemperatur und p der Druck der ge-

[...]essenen Luft in mm Quecksilber von 0°, so ist die gesuchte Dampfdichte d, da die [...]essene Luft wiegt: $v \,.\, 0{,}001\,293 \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{p}{760}$, $d = \frac{m}{v} \cdot \frac{760}{p} \cdot \frac{273+t}{273} \cdot \frac{1}{0{,}001\,293}$.

Ist b der Barometerstand, h die [W]asserhöhe im Meßrohr, also $h/13{,}6$ [d]ie entsprechende Quecksilberhöhe, so ist [p] $= b - h/13{,}6$.



Fig. 2958.

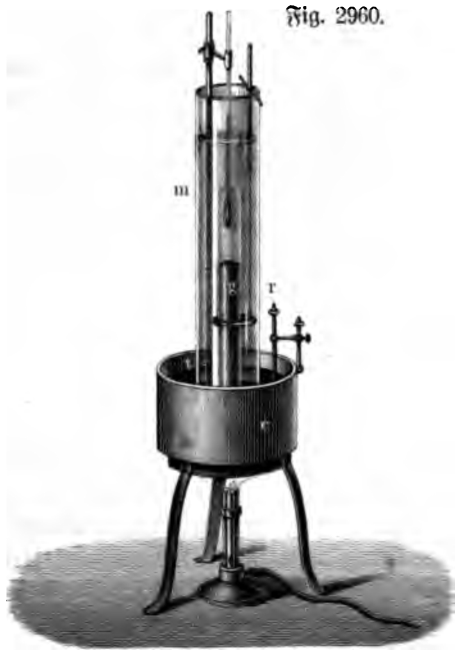


Fig. 2960.

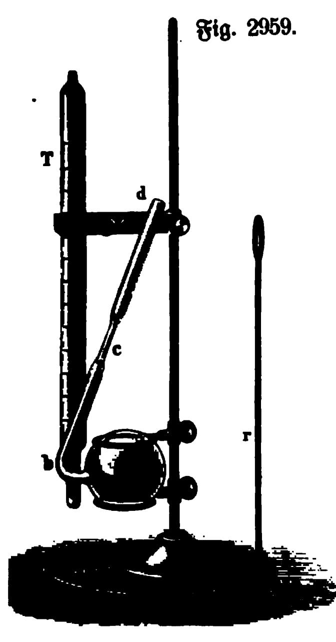


Fig. 2959.

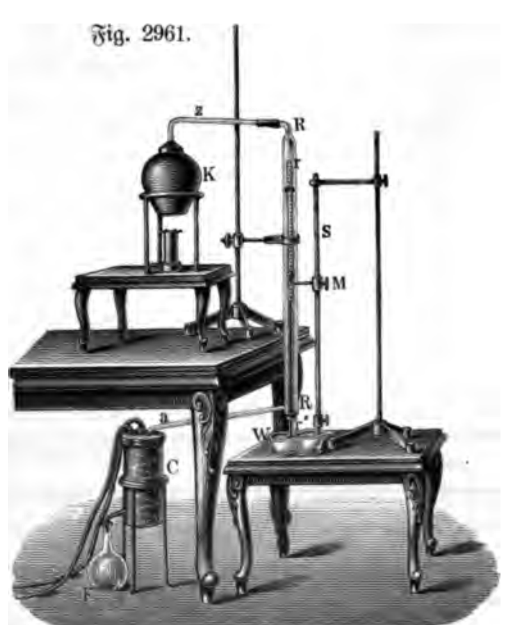


Fig. 2961.

Eine Korrektur ist noch insofern anzubringen, als die Luft in dem Gefäß [ge]wöhnlich nur zu $^2/_3$ mit Wasserdampf gesättigt ist, die im Meßrohr dagegen ganz[1]).

[1]) F. Kohlrausch, Handb. d. prakt. Physik, 9. Aufl., S. 80.

Andere Apparate zur Bestimmung der Dampfdichte haben heute kaum meh
als historisches Interesse, so die Apparate von Dumas (Fig. 2958 Lb, 3
und Fig. 2959 Lb, 22), von Gay=Lussac (Fig. 2960 Lb, 75), von H. S
Cl. Deville (W, 30), von A. W. Hofmann (Fig. 2961 Lb, 100).

Bei dem Dumasschen Verfahren werden einige Gramme der Substanz i
einen gut getrockneten, in eine Spitze auslaufenden Kolben gebracht, wie beim Fülle
eines Thermometers, sodann in einem Bad 10 bis 20° über den Siedepunkt erhitz
bis der letzte Rest Flüssigkeit verschwunden ist, worauf man sofort die Spitze m
der Lötrohrflamme zuschmilzt und gleichzeitig Temperatur und Barometerstand beo
achtet. Durch Wägen erfährt man das Gewicht des mit Dampf gefüllten Ballon
und nach Abbrechen der Spitze unter Wasser, wobei durch den Luftdruck Wasse
hineingetrieben wird, durch abermaliges Wägen den Inhalt des Ballons [1]).

Bei der Methode von Gay=Lussac und Hofmann läßt man ein mit de
Flüssigkeit gefülltes und abgewogenes Fläschchen (von gleicher Art wie bei der
Victor Meyerschen Verfahren) in das Vakuum eines durch einen Dampfmantel
heizbaren Barometers steigen, wobei man, um Zerspringen desselben zu verhüten, das
selbe soweit neigt, daß das Quecksilber oben fest anliegt. Andernfalls kann nämlic
falls die Verdampfung schon beim Aufsteigen beginnt, das überstehende Quecksilbe
mit großer Kraft nach oben geschleudert werden. Aus dem nach Heizen fest
gestellten Volum des gebildeten Dampfes, welches man z. B. an einer auf di
Röhre eingeätzten, durch Kalibrierung geeichten Skala ablesen oder nach Anbringun
einer Marke nachträglich etwa durch Auswägen mit Quecksilber feststellen kann, er
gibt sich ohne weiteres die Dampfdichte [2]).

Bei dem Verfahren der Metallverdrängung (nach V. Meyer) läßt ma
die abgewogene verdampfende Flüssigkeit Quecksilber oder Woodsches Metal
d. h. Flüssigkeiten, die keine merkliche Dampftension bei den betreffenden Tempe
raturen besitzen, aus einem Gefäß verdrängen [3]).

Das Gewicht von 1 cbm Wasserdampf beträgt beim Druck:

Atm.	kg	Atm.	kg	Atm.	kg
0,1	0,069	5	2,750	10	5,270
1	0,606	6	3,263	11	5,764
2	1,163	7	3,771	12	6,254
3	1,702	8	4,275	13	6,742
4	2,230	9	4,774	14	7,228

Das Volumen von 1 kg Wasserdampf ist beim Druck:

Atm.	cbm	Atm.	cbm	Atm.	cbm
0,1	14,552	5	0,364	10	0,190
1	1,650	6	0,306	11	0,173
2	0,860	7	0,265	12	0,160
3	0,587	8	0,234	13	0,148
4	0,448	9	0,209	14	0,138

[1]) Über die genaue Ausführung der Rechnung siehe Kohlrausch, Handb. d. prakt
Physik, 9. Aufl., S. 75. — [2]) S. Kohlrausch, a. a. O. S. 78. — [3]) S. Kohlrausch
a. a. O. S. 81.

391. Geysir-Phänomen. Ein der älteren Theorie von Bunsen entsprechendes [Mo]dell zeigt Fig. 2962 (E, 30).

Diese Theorie hat sich bekanntlich nicht bestätigt [1]).

Fig. 2962.



Fig. 2963.

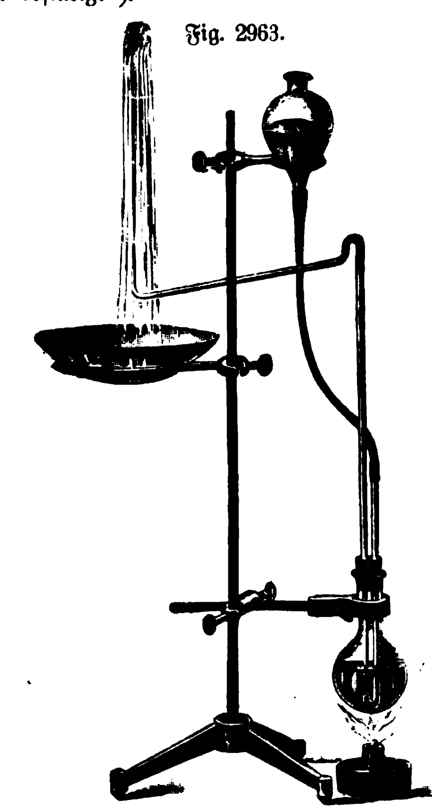


Fig. 2964.

G. Wiedemanns Geysirmodell ist dargestellt in Fig. 2963 [2]) (Lb, 15 Mk.).

392. Pulsometer. Bei dem Pulsometer wird das Wasser direkt durch Dampfdruck gehoben, indem durch Ventile eine fortgesetzte Umsteuerung des Dampfes bewirkt wird, derart, daß eine der beiden aus der Figur ersichtlichen Kammern infolge der Kondensation des Dampfes sich mit Wasser füllt, während der Wasserinhalt der anderen durch den Dampf hinausgedrückt wird [3]).

393. Die Dampfmaschine. Um die Bewegung eines Kolbens durch Dampfdruck sichtbar zu machen,

[1]) Ebert, Wied. Ann. 63, 342, 1897. — [2]) Über ein anderes, einfaches Geysir-[m]odell siehe P. Salcher, Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unterricht 5, 200, 1892; über ein [äh]nliches B. Schwalbe, Z. 10, 218, 1897. — [3]) Pulsometer für eine Leistung von 90 [bi]s 2100 Liter pro Minute sind zu beziehen von E. Sonnenthal, Berlin C., Neue Pro-[m]enade 6, zum Preise von 102 bis 1200 Mk. (Fig. 2964). Ferner liefern Pulsometer: [G]ebr. Körting, Körtingsdorf b. Hannover, M. Neuhaus u. Co., Berlin SW. 48, [W]. Henry Hall Nachf. Karl Eichler, Berlin SW., Wilhelmstraße 128 (Hof- und [G]artenpumpen) u. a. Häufig werden Druckfässer (S. 988) mit Dampf betrieben.

wird zuweilen ein kleiner Apparat benutzt, bestehend aus einem Glasrohr in Form eines Reagenzglases, in welchem sich ein leicht beweglicher Kolben befindet (Fig. 2965 Lb, 2,50). Wird Wasser darin zum Sieden gebracht, so wird der Kolben gehoben, bei Abkühlung hereingedrückt.

Ein ähnliches Modell, das Prinzip der Niederdruckdampfmaschine darstellend, zeigt Fig. 2966 (E, 36).

Da die Wasser- und Druckluftmotoren bereits besprochen sind, kann man sich bezüglich der mechanischen Einrichtung der Dampfmaschine, die hier natürlich ebenfalls nur als statischer Apparat in Betracht kommt, kurz fassen. Wollte man aber sich mit einfachen Mitteln ein Schiebermodell selbst herstellen, so könnte

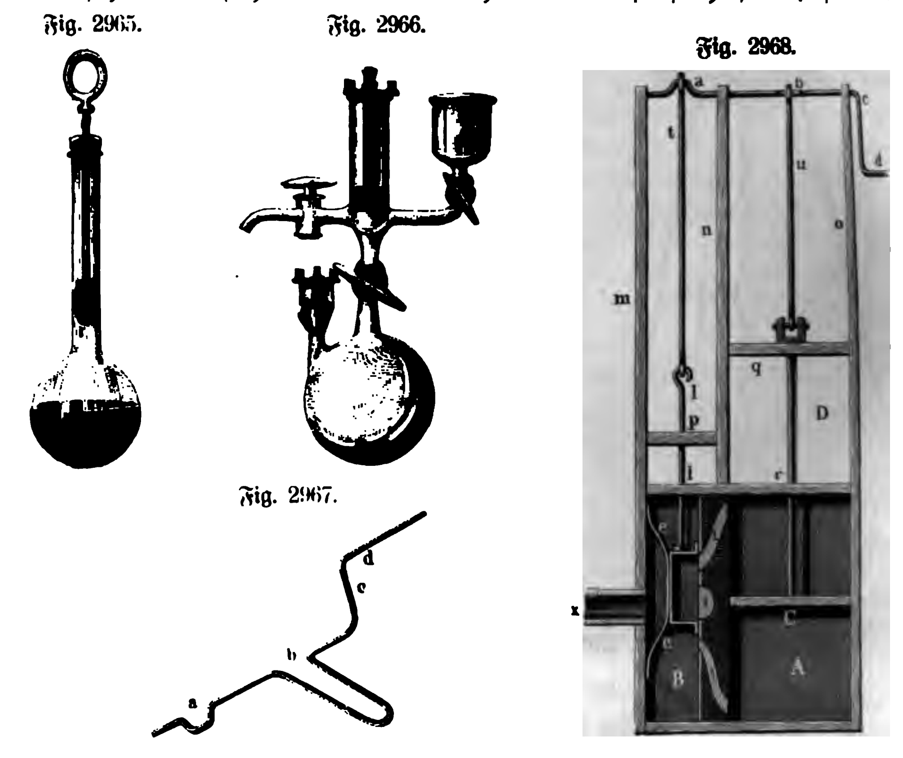


Fig. 2965. Fig. 2966. Fig. 2967. Fig. 2968.

man ungefähr in folgender Weise verfahren. Man biegt zuerst einen etwa 4 mm dicken Eisendraht, wie Fig. 2967, so, daß er zwei rechtwinklig zueinander stehende Kurbeln *a* — *b* erhält und außerdem noch eine, *cd*, deren Stellung gegen die beiden anderen gleichgültig ist. Hierzu läßt man nun ein hölzernes Gestell, wie Fig. 2968, machen. Dasselbe besteht aus den beiden rechteckigen, etwa 2 cm tiefen Abteilungen *A* und *B*, wovon erstere den Treibcylinder, letztere aber den Schieberkasten vorstellt. Auf die zwischen beiden befindliche breite Scheidewand werden Weiß in Schwarz die Kanäle 1, 2, 3 gezeichnet, welche vom Schieberkasten zum Cylinder (1, 3) oder in die freie Luft, bzw. zum Kondensator führen (2). Die Breite, mit der sie sich in dem Schieberkasten öffnen, ist gleich der Länge der Kurbel *a*, und ebenso breit macht man die Lappen des Schiebers, da hier von Expansion u. dergl. keine Rede sein kann. Der Schieber wird aus einem Messingstreifen oder auch aus Holz gemacht und dann gelb angestrichen, und durch eine gebogene, sich an die äußere Wand des Schieberkastens stemmende, auf den Schieber

genagelte leichte Feder *ee* gegen die Scheidewand zwischen dem Schieberkasten und dem Cylinder gedrückt. Auf diesen beiden Kasten *A* und *B* befinden sich drei Leisten *m*, *n*, *o*, wovon *m* und *o* zugleich die äußeren Wände von *A* und *B* bilden; *n* und *o* sind vom Kasten *A* an so weit hinauf geschlitzt, als der Kasten *A* lang ist; zwischen *m* und *n* befindet sich aber fest das Querstück *p*, um der Schieberstange *ll* als Führung zu dienen. Zwischen *n* und *o* wird noch vor der Zusammenfügung das Querstück, Fig. 2969, in den Schlitz eingesetzt, welches sich darin leicht verschieben läßt. Der Kolben *C* besteht aus einem Stückchen Holz, und die hölzerne Kolbenstange *D* wird durch das Querstück *q* und eine bei *r* befindliche Öffnung in den Kolben *C* gesteckt und in *q* und in *C* verleimt. Zuletzt macht man die beiden Gelenkstangen *t* und *u*, von denen letztere in der Zeichnung verkürzt erscheint, weil ihre Kurbel horizontal steht, aus starkem Drahte, und legt die Achse in Einschnitte der Leisten *m*, *n*, *o*, in welchen

Fig. 2969.

Fig. 2970.



Fig. 2971.



sie durch darüber eingeschlagene Drahtbügel gehalten wird. Die Schieberstange *l* wird aus Draht gemacht, unterhalb mit einer Schraube versehen, und der Schieber durch zwei Muttern so an der Stange befestigt, daß er bei horizontaler Stellung der Kurbel *a* auf der Mitte der Scheidewand zwischen *A* und *B* steht. Es ist am zweckmäßigsten, erst jetzt die Kanäle 1, 2, 3 aufzuzeichnen und sich dabei nach der Bewegung, die der Schieber wirklich macht, zu richten. Eine kleine Röhre *x* stellt das Dampfrohr vor. Dreht man nun an der Kurbel *cd*, so machen der Kolben und der Schieber die entsprechenden Bewegungen, so daß man diesen wichtigsten Teil der Dampfmaschine vollständig erläutern kann.

Ein vollkommeneres Schiebermodell ist bereits auf S. 984 abgebildet [1]).

Ein von Stöhrer geliefertes Modell (S, 30) ist so klein, daß es mittels des Projektionsapparates auf einen Schirm projiziert werden kann. Es ist beiderseits durch Glasplatten luftdicht geschlossen, so daß man mittels eingeblasenen Tabak-

---

[1]) Ein Modell mit Centrifugalregulator nach Fig. 2970 liefert F. Ernecke in Berlin, zu 85 Mk. Besprechung in Kap. IX.

Fig. 2972.



Fig. 2973.

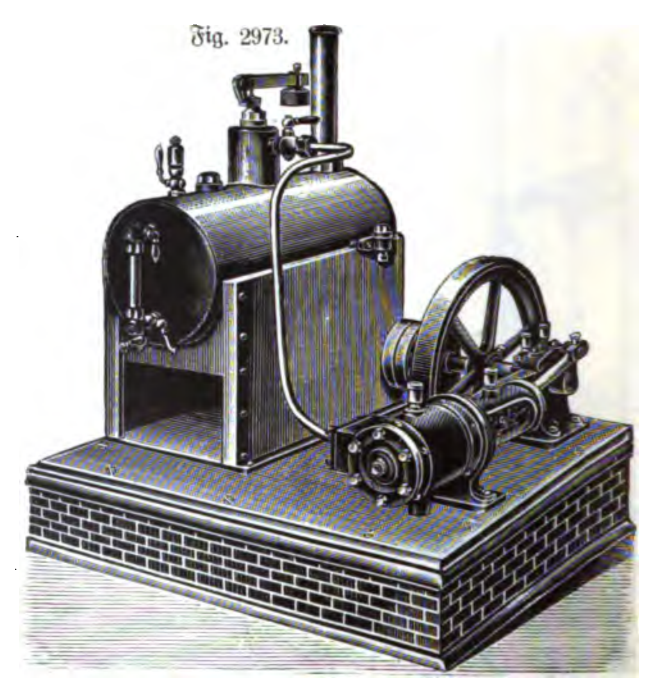
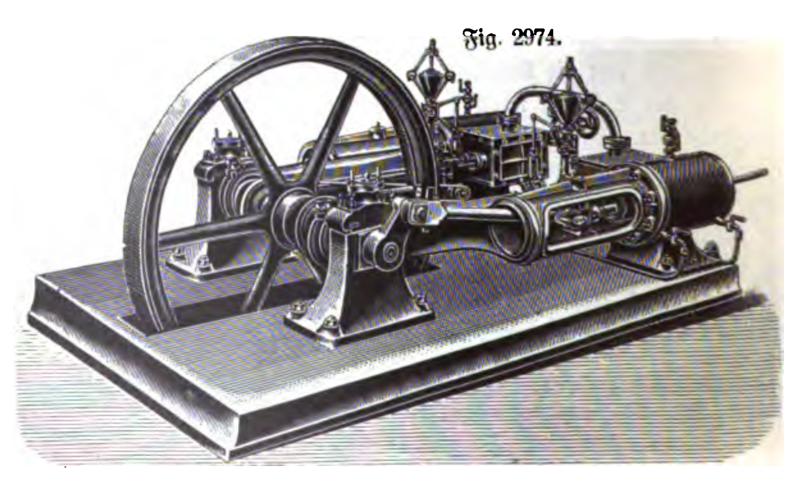


Fig. 2974.



pfes die Wege, welche die Luft (der Rauch) durchläuft, auf dem projizierten
e sehr gut verfolgen kann.

Verschiedene kleine Modelle von Hochdruckdampfmaschinen sind dargestellt
en Fig. 2971 (Lb, 48), 2972 (Lb, 30), 2973 (Lb, 120), 2974 (Lb, 750)[1].

Modelle der Nieder-
ckmaschinen zeigen die
uren 2975 (Lb, 215) und
'6 (Lb, 440).

Zur anschaulichen Dar-
ung der inneren Einrich-
 kann auch die Tafel
. 2977 (E, 450) dienen.

Ein Modell der Loko-
bile ist dargestellt in
. 2978 (Lb, 580), eine
el, Lokomotive mit be-
lichen Teilen, in Fig. 2979
27), ein Modell der Um-
rung in Fig. 2980 (K, 550).

Dampfschiffmodelle
en Warmbrunn, Qui-

Fig. 2975.

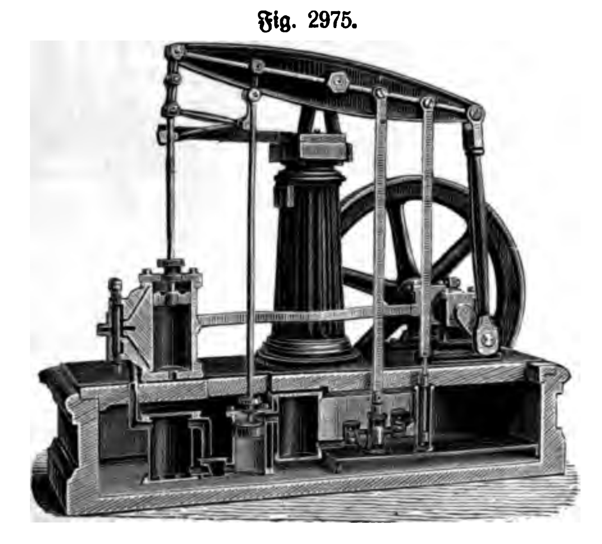
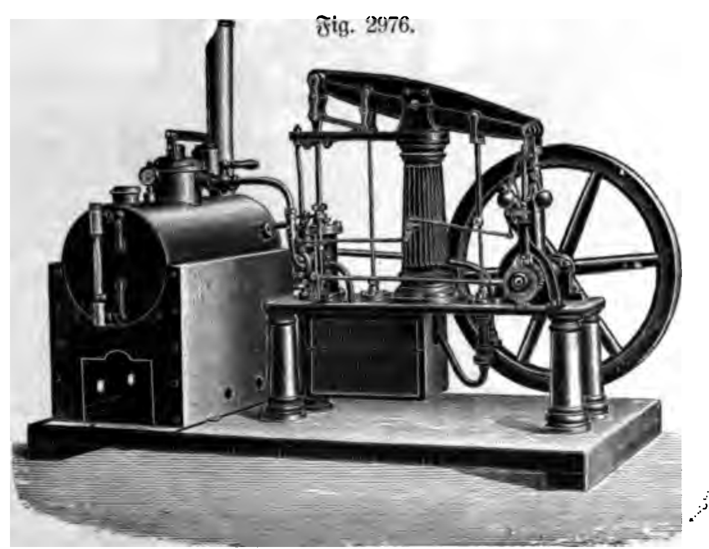


Fig. 2976.



u. Co. von 125 bis 500 Mk., einen kleinen Schraubendampfer mit doppeltwirken-
oszillierenden Zylinder zu 50 Mk., und ähnliches Spielzeug Kleist in Leipzig.

[1]) Kleine Modelldampfmaschinen sind zu beziehen von Gebr. Bing, Metall- und
erwarenfabrik, Nürnberg; Wachenfeld u. Schwarzschild, Kassel; Leipziger Lehr-
lanstalt, Leipzig u. s. w. Kleine Dampfmaschinen von 1/4 bis 3/4 Pferdekraft zum Preise
350 bis 550 Mk. einschließlich Kessel sind zu beziehen von Daberkow und Rötsch,
zig-Reudnitz; Dampfsparmotore von Edmund Friederich, Feuerbach b. Stuttgart
is 4-pferdige Motoren kosten 1340 bis 2500 Mk.): ein kleiner eigenartiger Druckluft- und
pfmotor von den Ateliers de Construction 4, rue des Ecluses, St. Martin, Paris.

Fig. 2977.

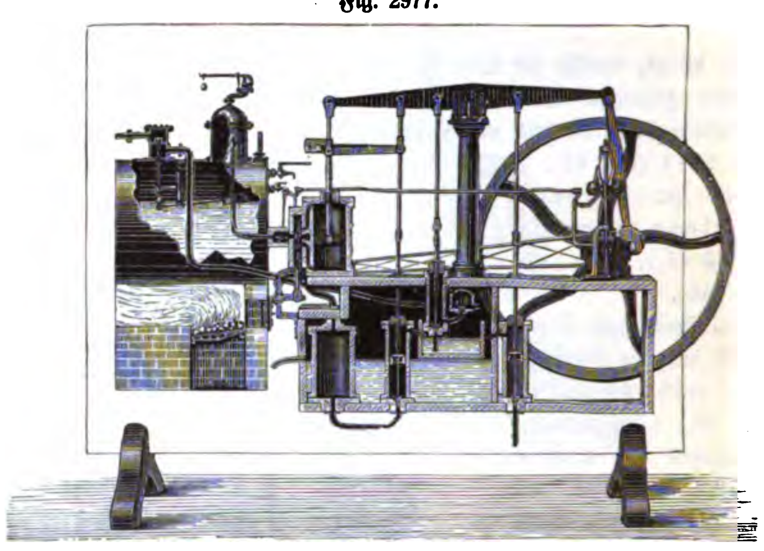


Fig. 2978.

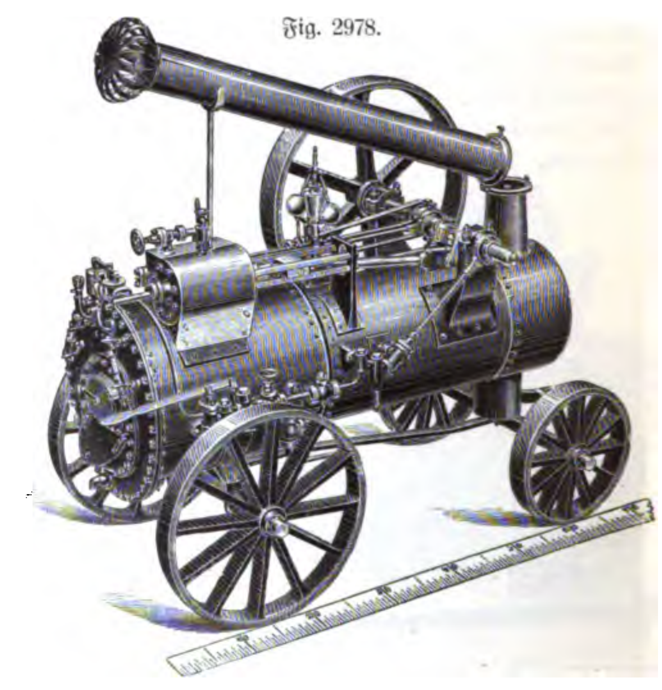
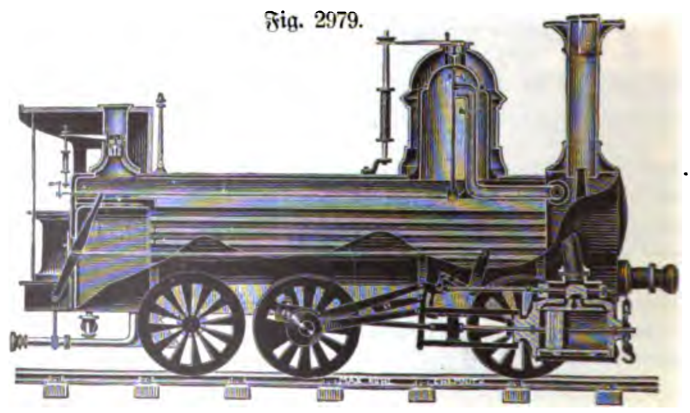


Fig. 2979.



Man kann namentlich darauf hinweisen, daß die Dampfmaschinen mechanische Arbeit leisten oder potentielle Energie erzeugen können, z. B. durch Hebung eines Gewichtes, ohne daß scheinbar ein gleicher Betrag von Energie verloren geht. Der Nachweis, daß auch hier das Gesetz der Energie gilt, kann erst später gegeben werden.

An dieser Stelle wird die Dampfmaschine nur als statische Maschine betrachtet, man wird ebenso, wie es früher bei Flaschenzügen, Räderwerken u. s. w. geschehen ist, untersuchen können, welche Last bei bestimmtem Kolbenquerschnitt und Dampfdruck gehoben werden kann, vorausgesetzt, daß die Kurbel nicht auf dem toten Punkte steht, oder im Falle zwei gekreuzte **Kurbeln** oder drei um 120° von einander abstehende vorhanden sind. Die Betrachtung des letzteren Falles empfiehlt sich namentlich mit Rücksicht auf die Analogie zu den Drehstrommotoren.

Fig. 2980.



394. Die kritische Temperatur. Um Gase auch bei höheren Temperaturen komprimieren und so die Existenz des kritischen Punktes nachweisen zu können, läßt sich bei dem Apparate von **Cailletet** auf *A*, Fig. 2790 (S. 1021), eine Scheibe *s* mit der Glasröhre *M* und dem weiten Glasgefäße *C* aufschrauben. Die Glasröhre *M* wird mit warmem Wasser gefüllt, welches eventuell durch den Hahn *r* wieder abgelassen werden kann. Vor dem Einbringen des warmen Wassers beseitigt man den Druck aus dem Apparate und komprimiert erst wieder, nachdem die Röhre gut durchwärmt ist. Das Gefäß *C* dient nur zum Schutze gegen Glassplitter bei etwaigen Explosionen[1]). Über die Pumpe u. s. w. siehe S. 1022.

Man komprimiert zunächst bei Temperaturen, welche einige Grade über der kritischen (für Kohlensäure 31°) liegen und zeigt, daß eine Scheidung in Flüssigkeit und Gas nicht auftritt, dann wiederholt man das Experiment einige Grade unter der kritischen Temperatur, wobei die Grenze zwischen Flüssigkeit und Gas deutlich sichtbar wird. Oberhalb der kritischen Temperatur nimmt der Druck bei fortschreitender Kompression stetig zu, unterhalb derselben bleibt er so lange konstant, als Verflüssigung stattfindet; desgleichen beim Nachlassen des Druckes, so lange Verdampfen stattfindet[2]).

Einen einfacheren Apparat zeigt Fig. 2789 (K, 40) (s. S 1021).

Will man nur das Verschwinden der Grenzfläche von flüssiger gegen gasförmige Kohlensäure bei der kritischen Temperatur zeigen, so kann man die halb mit flüssiger, halb mit gasförmiger Kohlensäure gefüllten Röhren benutzen, welche

[1]) Zu beziehen von E. Ducretet u. Co., Constructeurs, Paris, Rue Claude-Bernard Nr. 75. Die Apparate werden in zwei Größen, für 300 und 1000 Atm. Druck berechnet, hergestellt. (Preis 530 Mk.). — [2]) Man kann mittels des Cailletetschen Apparates auch die starke Kompressibilität der Flüssigkeiten in der Nähe des kritischen Punktes nachweisen.

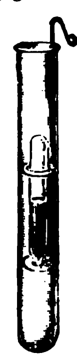
fertig im Handel zu haben sind[1]). Dieselben eignen sich sehr gut zur Projektion der Erscheinungen, wenn man sie in einen mit Wasser gefüllten, parallelepipedischen Glastrog mit planparallelen Wänden einsenkt.

Durch ein in den Trog eingesetztes dünnes Schlangenrohr aus Zinn, durch welches man entweder kaltes oder heißes Wasser oder Dampf leitet, kann die Temperatur des Wassers im Troge während der Projektion leicht geändert werden.

Ganz ausgezeichnet eignet sich auch zur Projektion das von Weinhold angegebene Verfahren mit einer kleinen Abänderung von Polis. Man benutzt hierbei ein kleines, nur etwa 4 cm langes Glasröhrchen von $2\frac{1}{2}$ mm innerem und 5 mm äußerem Durchmesser, welches halb mit flüssiger schwefliger Säure gefüllt ist[2]) (Fig. 2982 Lb, 5,5).


Fig. 2981.

Dasselbe wird axial in einem Reagenzgläschen auf einem Gestell aus feinem Draht angebracht und auf einen Schirm projiziert. Erwärmt man nun das Reagenzgläschen, welches als Luftbad dient, durch Bestreichen mit einer Gasflamme, so beobachtet man (insbesondere wenn auf dem Schirm horizontale Linien gezogen sind) eine erst langsame, dann rasche Ausdehnung der Flüssigkeit, wobei gleichzeitig deren Oberfläche immer ebener wird, und endlich zwischen 150 und 160° verschwindet diese ganz. Kühlt man nun wieder ab, so tritt zuerst ein dichter Nebel auf und bald erscheint das Röhrchen wieder halb mit Flüssigkeit erfüllt, in welcher sich deutlich hervortretende, lebhaft bewegte Schlieren zeigen.


Fig. 2982.

Das Schwefligsäureröhrchen wird in einem Futteral vor Licht geschützt aufbewahrt und kann unzählige Male zu dem Versuche benutzt werden.

Sowohl die Kohlensäure wie die schweflige Säure zeigen in der Nähe der kritischen Temperatur, wie man aus dem Versuche erkennen kann, im flüssigen Zustande einen ganz abnorm großen Ausdehnungskoeffizienten, woran man die Annäherung an den Gaszustand erkennen kann. Ebenso macht sich diese geltend, wie man beim Schütteln der Röhren erkennt, durch außerordentlich große Beweglichkeit der flüssigen Masse. Man bekommt im Handel Röhren, die bis auf einen kleinen Raum mit Kohlensäure gefüllt sind, so daß beim Erwärmen in der Hand sich bald die Kohlensäure so stark ausdehnt, daß sie das ganze Rohr erfüllt. Mit diesen Röhren muß man aber sehr vorsichtig operieren, da, sobald die Flüssigkeit den ganzen Raum einnimmt, bei Erwärmung der Druck viel rascher zunimmt, als wenn nur Gas vorhanden ist. Jedenfalls muß durch vorgeschobene dicke Spiegelglasscheiben u. dergl. Sorge ge-

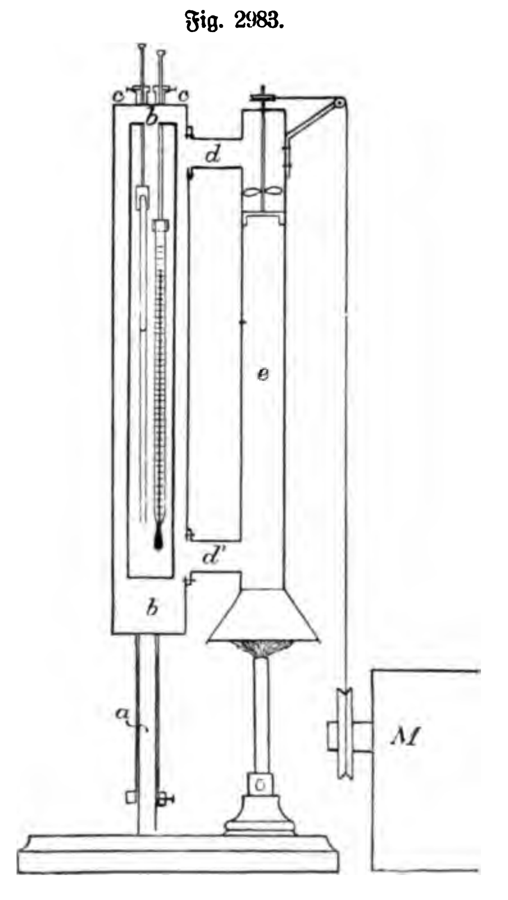
[1]) Die Röhren können von Dr. Johann Natterer (dem Erfinder der Pumpe), Wien, Kleine Stadtgutgasse 3, oder durch Vermittelung von Lenoir und Forster (Wien IV/1, Waaggasse 5) bezogen werden. (Fig. 2981 Lb, je 18.) — [2]) Arrhenius benutzt (nach Heumann-Kühling, Anleitung zum Experimentieren, S. 91) ein mit Äther gefülltes Röhrchen von etwa 10 ccm Inhalt, welches in einem weiteren Glasrohr mittels einer kleinen Flamme vor dem Projektionsapparat erhitzt wird. Wegen der Möglichkeit einer Explosion ist große Vorsicht nötig.

tragen sein, daß im Falle einer Explosion niemand von Glassplittern getroffen werden kann.

Hier wäre auch aufmerksam zu machen auf die Änderung der Kompressibilität der Flüssigkeiten mit der Temperatur, die Kraft der thermischen Ausdehnung bei konstantem Volumen u. s. w.

Zakrzewski (Z. 8, 311, 1895) benutzt zur Erhitzung der Natterer'schen Röhren ein Luftbad mit Projektionsthermometer von der in Fig. 2983 dargestellten Einrichtung. Ein solches Luftbad bietet hinsichtlich der Strahlenbrechung wesentliche Vorteile vor einem Wasserbade. Der Kasten ist 42 cm hoch, 6 cm breit und 3 cm tief und auf gegenüber stehenden Seiten mit Fenstern aus Spiegelglas versehen. Die Metallwände sind innen mit Filz verkleidet. Die seitlichen Messingröhren *d*, *d'*, welche in ein Kupferrohr *e* münden, sind vom Kasten durch Asbestringe isoliert. Das Kupferrohr ist unten dicht verschlossen durch eine Kupferplatte und wird durch einen Brenner geheizt. Ein kleines, durch einen Motor *M* getriebenes Flügelrädchen bewirkt die Luftzirkulation. Man entfernt die Flamme schon, wenn die Temperatur etwa bis 26° gestiegen ist, da sie nach und nach alsdann bis 32° steigt. Bestimmt man die Höhe der Kohlensäure in der Röhre, wobei die Thermometerskala als Maßstab dienen kann, so läßt sich auch der Ausdehnungskoeffizient der flüssigen Kohlensäure bestimmen.

Fig. 2983.

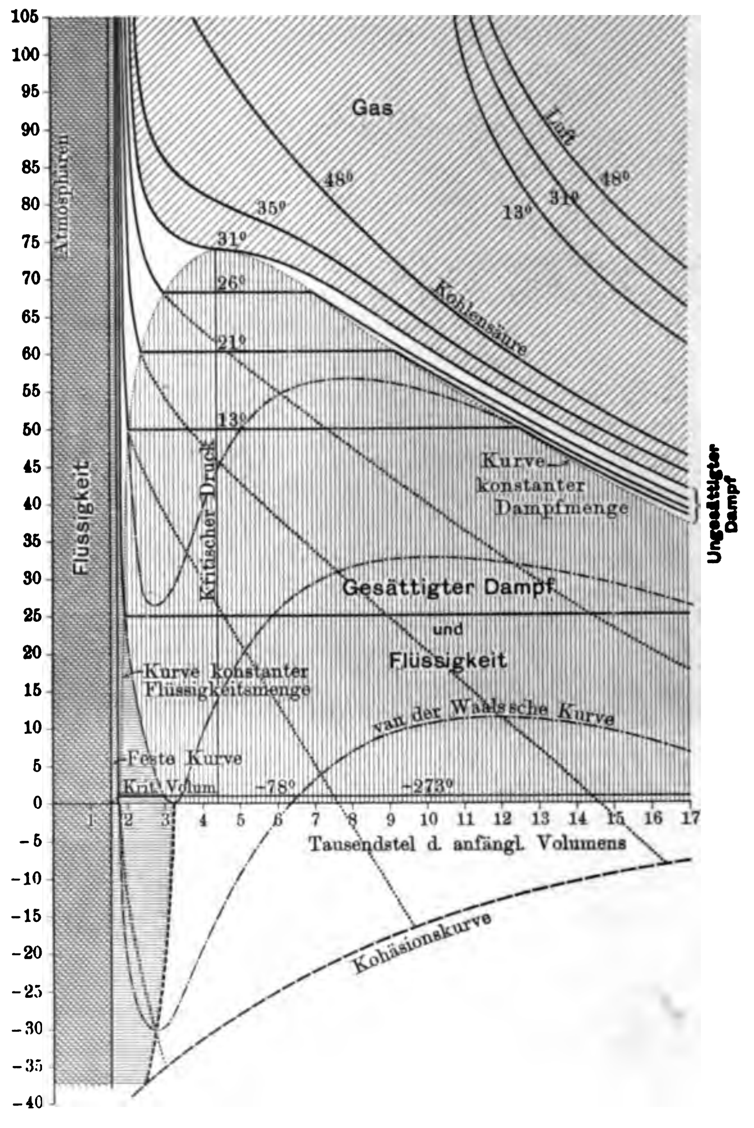


Barus (Beibl. 20, 856, 1896) macht darauf aufmerksam, daß man niemals gleichzeitig ein scharfes Bild der flüssigen und gasförmigen Kohlensäure erhält, vielmehr, nachdem erstere scharf eingestellt ist, die Linse 6 cm vorwärts schieben muß, um die Dampfsäule zu projizieren, und zwar war dies auch noch im Momente des Verschwindens des Meniskus der Fall, woraus Barus schließt, daß die Molekularkonstitution der Flüssigkeit und des Dampfes auch dann noch verschieden seien.

395. Die Zustandsgleichung. Die Zustandsänderungen lassen sich übersichtlich darstellen durch die sog. Druckkurven (S. 995). Die Fig. 2984 enthält z. B. die Isothermen für Luft und Kohlensäure für 13°, 31° und 48°. Man erkennt, daß die zu gleicher Verminderung des Volumens erforderlichen Drucke für Kohlensäure wesentlich kleiner sind als für Luft und daß unter 31,35° (der kritischen Temperatur nach Andrews) bei Kohlensäure die Druckkurve überhaupt nicht mehr stetig

verläuft, sondern zwei Knicke aufweist, zwischen welchen ein vollkommen geradliniges horizontales Stück liegt. Dieses entspricht der **Verflüssigung**, da während desselben, wie sehr auch das Volumen vermindert werden mag, der Druck stets denselben Wert (Druck des **gesättigten Dampfes, Dampftension**) behält. Erst wenn bei

Fig. 2984.



fortgesetzter Volumenverminderung aller Dampf kondensiert ist, d. h. vom zweiten Knick an, wächst der Druck, und zwar außerordentlich stark, da die Flüssigkeiten nur in sehr geringem Maße kompressibel sind. Je niedriger die Temperatur, um so länger wird das geradlinige horizontale Stück. Bei — 78°, der Siedetemperatur unter gewöhnlichem Luftdruck, beträgt der Abstand von der Abscissenachse *ov* nur noch 1 Atmosphäre. Bei — 273°, dem absoluten Nullpunkt, würde es mit der Abscissenachse zusammenfallen. Die punktierte Linie, welche die linken Knicke verbindet, ist

die Kurve konstanter Flüssigkeitsmenge, da für die Punkte links von derselben die gesamte vorhandene Stoffmenge in flüssigem Zustande vorhanden ist. Die punktierte Linie, welche die Knicke rechts verbindet, ist die Kurve konstanter Dampfmenge, da für alle Punkte derselben die gesamte Stoffmenge sich im Zustande des gesättigten Dampfes befindet. Beide treffen sich oben im kritischen Punkt, dessen Koordinaten der kritische Druck und das kritische Volumen die Werte 72,9 Atm. bzw. 4,26 Tausendstel (des Anfangsvolumens) betragen. Für einige andere Stoffe sind die kritischen Daten folgende:

Substanz	Temperatur	Druck	Spezifisches Volumen
Wasser	364	195	0,0039
Äther	197	35,7	0,0158
Schwefelkohlenstoff	273	73,8	0,0090
Schweflige Säure	156	78,9	0,0059
Alkohol	244	63	0,0071
Benzol	289	48	0,0098

Denkt man sich die Substanz ursprünglich zur Flüssigkeit verdichtet und nun den Druck allmählich vermindert, so beginnt dieselbe, sobald der Knick der Druckkurve erreicht wird, in gesättigten Dampf überzugehen und ist vollständig in solchen umgewandelt, wenn der zweite Knick erreicht ist. Nicht unter allen Umständen tritt indes die Bildung der dampfförmigen Modifikation wirklich ein, es kann vielmehr unter besonders günstigen Umständen (in sehr reinen Gefäßen, bei vollkommener Ruhe) ein sogenannter Siedeverzug eintreten, d. h. die Substanz vergrößert ihr Volumen bei fortschreitender Abnahme des Druckes, ohne den flüssigen Zustand zu verlieren. Es gibt somit auch eine stetige Fortsetzung der Druckkurven über den Knick auf der linken Seite hinaus, welche nach van der Waals die durch die S-förmigen (in Fig. 2984 durch —·— gekennzeichneten) Stücke dargestellte Form hat. Wäre dieser aus theoretischen Betrachtungen sich ergebende Verlauf der wahre, so könnte z. B. die flüssige Kohlensäure bei 13° nicht als Flüssigkeit bezeichnet werden, da sie nicht im stande wäre, einen negativen Druck auszuhalten, Flüssigkeiten aber von Gasen sich dadurch unterscheiden, daß sie Kohäsion besitzen, d. h. einen negativen Druck ertragen können[1]). Da nun die flüssige Kohlensäure bei 13° Tropfen bilden kann, also zweifellos Oberflächenspannung besitzt, somit tatsächlich einen Zug (S. 836) zu ertragen im stande ist, muß man nach meiner Ansicht[2]) annehmen, daß die wahre Fortsetzung der Druckkurven etwa die durch die punktierten Linien dargestellte ist, welche sich unter die Abscissenachse fortsetzen und auf der als Kohäsionskurve bezeichneten Linie endigen. Letztere muß sich jener Achse asymptotisch nähern, da für die kritische Isotherme die Kohäsion gleich 0 werden muß, insofern bei der kritischen Temperatur die Oberflächenspannung verschwindet.

Auch bei den Knicken der Zustandskurven auf der rechten Seite läßt sich unter Umständen eine stetige Fortsetzung der Kurve über den Knick hinaus, etwa ent-

[1]) Um dies deutlicher hervortreten zu lassen, ist das Gebiet bis zur „Kurve konstanter Flüssigkeitsmenge“ nicht schraffiert, sondern weiß gelassen, ebenso wie das Gebiet zwischen kritischer Isotherme und „Kurve konstanter Dampfmenge“, welches dem übersättigten Dampf entspricht. — [2]) Siehe O. Lehmann, Ann. d. Physik 12, 340 (1903).

sprechend dem nach oben gehenden Teil der S-förmigen Kurve, beobachten, d. h. bei fortgesetzter Kompression des Dampfes tritt nicht, sobald die Tension des gesättigten Dampfes erreicht ist, sofort Verflüssigung ein, sondern der Druck wächst weiter und der Stoff bleibt gasförmig. (Labiler, übersättigter Zustand.)

Solche Kondensationsverzüge, welche ähnlich auch bei Abkühlung eines überhitzten Dampfes unter den Kondensationspunkt (Unterkühlung) eintreten können, setzen die Abwesenheit von Kondensationskernen, als welche Staubpartikelchen, elektrische Atome (Jonen) u. s. w. wirken können, voraus [1]).

Immerhin läßt sich dieser aufsteigende Teil der S-förmigen Kurve nur auf eine sehr kurze Strecke verfolgen. Der sich daran anschließende nach abwärts gerichtete mittlere Teil entspricht einem unmöglichen Zustande, da hier die Volumenverminderung eine Druckabnahme zur Folge hat, somit der Kompression sich kein Widerstand entgegensetzt und sich dieselbe auch bei konstantem äußeren Drucke so weit fortsetzen müßte, bis der Flüssigkeitszustand erreicht ist.

Die Gleichung der S-förmigen Kurven ist nach van der Waals:

$$\left(p_{\cdot} + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = const.,$$

wobei der Wert von a bedingt ist durch die Anziehungskraft der Moleküle und b durch deren Größe, so daß man, falls diese Zustandsgleichung bekannt ist, auf letztere Größen Schlüsse ziehen kann.

Werden p, v und t nicht in Atmosphären, Cubikcentimetern und Graden angegeben, sondern als Bruchteile der kritischen Daten ausgedrückt (z. B. $p = 0{,}1$; $0{,}2$; $0{,}3$ des kritischen Druckes) — man nennt sie dann reduzierte Zustandsgrößen — so nimmt die Zustandsgleichung eine Form an, welche für alle Stoffe annähernd gleich ist. (Satz von den korrespondierenden Zuständen).

Es ist nämlich der kritische Druck $\pi = a/27\,b^2$, das kritische Volumen $\varphi = 3b$ und die kritische Temperatur ϑ genügt der Gleichung $1 + \alpha\vartheta = 8a/27b$. Ist nun $p = \varepsilon\pi$, $v = n\varphi$ und $1 + \alpha t = m\,(1 + \alpha\vartheta)$, so ergibt sich: $(\varepsilon + 3\,n^2)$ $(3n - 1) = 8m$, die reduzierte Zustandsgleichung.

Die Beobachtungen haben indes sehr viele Ausnahmen von diesem Gesetz ergeben, so daß man sich genötigt gesehen hat zu versuchen, die van der Waalssche Zustandsgleichung durch eine bessere zu ersetzen.

Oberhalb der kritischen Isotherme liegt das Gebiet der gasförmigen Zustände, deren Kohäsion nach Definition gleich 0 ist. Das Gebiet zwischen der kritischen Isotherme und der Kurve konstanter Dampfmenge entspricht dem Zustande des ungesättigten oder überhitzten Dampfes. Annähernd, doch nicht genau, folgt hier die Substanz dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetze. Die graphische Darstellung läßt ferner erkennen, daß die Kompressibilität der Flüssigkeiten sowie ihre thermische Ausdehnung in der Nähe des kritischen Punktes außerordentlich groß ist. Wäre es möglich, die Druckverminderung bei Siedeverzügen stets bis zur Kohäsionskurve fortzusetzen, so entspräche das Gebiet unterhalb der kritischen Isotherme den flüssigen Zuständen und die Kurve konstanter Flüssigkeitsmenge wäre die Grenze zwischen den stabilen und labilen flüssigen Zuständen, welche letztere beim geringsten Anlaß in zwei Phasen, d. h. ein Gemenge von gesättigtem Dampf und stabiler Flüssigkeit zerfallen. Wäre die van der Waalssche

[1]) Näheres weiter unten nach Besprechung der Abkühlung durch Expansion.

Auffassung zutreffend, so müßte als Grenze des Flüssigkeitszustandes der linke Teil derjenigen S-förmigen Kurve betrachtet werden, welche mit ihrer unteren Biegung die Abscissenachse berührt, sowie die in der Figur angedeutete, von hier abwärts gehende punktierte Linie. Dann würde aber bei höher gelegenen Isothermen eine sprungweise Kondensation des Dampfes zu einem Gas anzunehmen sein [1]).

Ist p der Druck, v das Volumen und τ die absolute Temperatur eines Gases, so ist die Gleichung der Druckkurve für ein vollkommenes Gas $pv/\tau = const.$ Die Konstante, bezogen auf die Masseneinheit (1 g), heißt die Gaskonstante [2]). Da das Molekulargewicht eines Gases nach dem Satze von Avogadro proportional seiner Dichte ist [3]), nämlich $= 28{,}88 . D$, wenn das Molekulargewicht des Wasserstoffs $= 2$ gesetzt wird und D das spezifische Gewicht bezogen auf Luft bedeutet, so müssen die Gaskonstanten sich umgekehrt wie die Molekulargewichte verhalten. Wird der Druck in Dynen pro Quadratcentimeter (Bar) gerechnet, so ist die Gaskonstante $= 83016000 . 1/\mu$, wenn μ das Molekulargewicht bedeutet. Beträgt das Gewicht einer Gasmenge m Gramm, so ist hiernach deren Zustandsgleichung: $p . v = 83016000 . m/\mu . \tau$. Bezeichnet man die Menge μ Gramm als ein Grammmolekül, so ist m/μ die Anzahl der Grammmoleküle. Sie sei $= N$, dann ist die Zustandsgleichung $p . v = 83016000 . N . \tau$. Wird der Druck in Atmosphären und das Volumen in Litern statt in Cubikcentimetern gemessen, so ist $p . v = 0{,}0819 . N . \tau$. Hiernach beträgt beim Druck von 1 Atm. und der Temperatur 0° C das Volumen eines Grammmoleküls 22,3 Liter, gleichviel welches die chemische Natur ist.

Sind N_1, N_2, $N_3 \ldots$ Grammmoleküle verschiedener Gase gemischt, so ergibt sich nach dem Daltonschen Gesetze, welchem zufolge der Druck des Gemisches gleich der Summe der Partialdrucke, d. h. der Drucke der Gase, wenn jedes allein vorhanden wäre, ist, als Zustandsgleichung des Gemenges:

$$p . v = 83016000\,(N_1 + N_2 + N_3 \ldots) . \tau .$$

Zur experimentellen Feststellung der Zustandsgleichung kann man das Volumen der Cailletetschen Kapillare auf dem Projektionsschirm mit dem Zirkel ausmessen, indem man gleichzeitig einen kleinen auf Glas geteilten Maßstab projiziert. Aus dem am Manometer abzulesenden Druck vor Beginn der Verflüssigung ergibt sich unter Anwendung des Mariotteschen Gesetzes annähernd das Anfangsvolum. Die Temperatur kann an einem kleinen Stöhrerschen Thermometer, welches man mit projiziert, ebenfalls auf dem Schirm abgelesen werden.

396. Änderung der Oberflächenspannung durch Erwärmung. Da bei der kritischen Temperatur die Oberflächenspannung verschwindet, muß sie bei niedrigeren Temperaturen mit steigender Temperatur sich vermindern. Dies gilt auch dann noch, wenn die Flüssigkeit nicht mit ihrem Dampfe, sondern mit einem anderen Gase oder einer anderen Flüssigkeit in Berührung ist.

W. Holtz (1886) bringt in die Mitte einer genau horizontal gelagerten Glasröhre von 5 bis 6 mm innerem Durchmesser einen kurzen Wasserfaden. Wird das eine Ende desselben durch eine angenäherte Flamme erwärmt, so bewegt er sich nach der entgegengesetzten Seite.

[1]) S. a. O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, S. 237 u. ff. — [2]) Gipsmodelle, bei welchen die Isothermen entsprechend der Temperatur verschiedene Höhenlage haben, beschreibt A. Ritter, Wied. Ann. 1878, 3, 614; 4, 550. — [3]) Näheres hierüber kann erst im XI. Kapitel mitgeteilt werden.

Rebenstorff (Z. 17, 223, 1904) benutzt ein U-Rohr, dessen einer Schenkel schrägt ansteigt. Der andere wird durch einen Dampfstrahl erhitzt.

397. **Kritische Lösungstemperatur.** Phenol wird nach Alexejew (1875) mit steigender Temperatur in Wasser immer leichter löslich und endlich bei 180° in allen Verhältnissen damit mischbar. Ebenso löst sich umgekehrt Wasser in flüssigem Phenol immer leichter, bis schließlich bei 180° dieselbe Lösung resultiert wie bei Herstellung auf umgekehrtem Wege. Man könnte diese Temperatur die „kritische“ Lösungstemperatur nennen [1]). Für Wasser und Isobutylalkohol ist sie 116 bis 123°, für Kresol 118 bis 119°, für Anilin 114°.

Guthrie (1884) zeigte, daß ein Gemisch von Triäthylamin und Wasser beim Erwärmen sich in zwei Teile scheidet. Mischungen von Alkohol und Schwefelkohlenstoff zeigen umgekehrt beim Abkühlen milchige Trübung. Nikotin zeigt ebenfalls mit der Temperatur abnehmende Löslichkeit in Wasser.

Parmentier (1887) zeigt, daß eine Lösung von Phosphormolybdänsäure in Äther beim Erwärmen Äther abscheidet und denselben beim Abkühlen wieder aufnimmt.

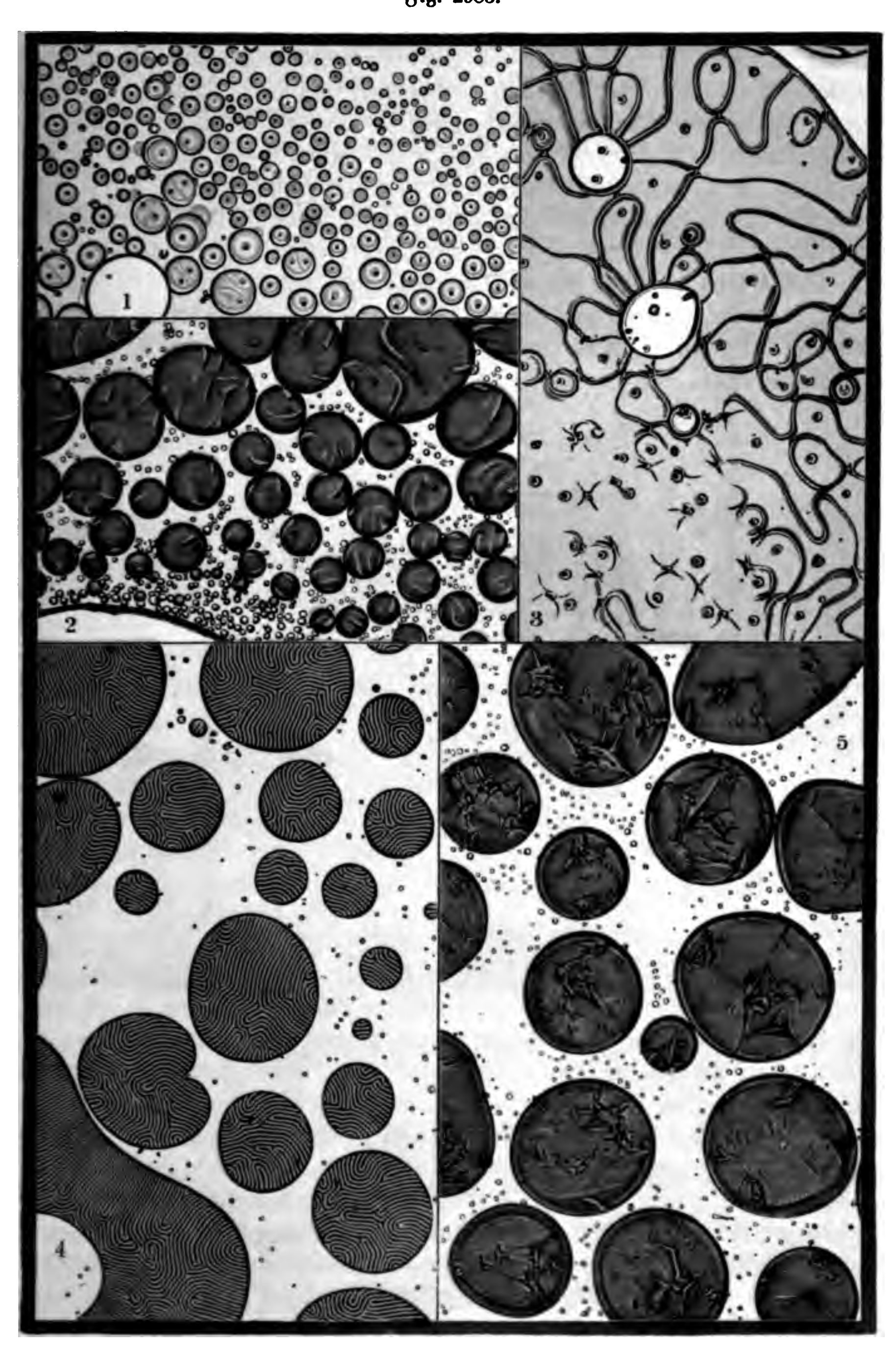
Eine Mischung von Alkohol mit Lösung von schwefelsaurem Ammoniak teilt sich nach Traube und Neuberg (1887) in zwei Schichten, deren Mengenverhältnis mit der Temperatur variiert.

Um Verdunsten zu verhüten, werden bei diesen Versuchen die Flüssigkeitsmengen in Glasröhren eingeschmolzen, welche beim Gebrauch in einem rechtwinklig parallelepipedischen, mit Wasser gefüllten und durch eine Dampfschlange heizbaren Glastrog stehend projiziert werden.

398. **Flüssige Kristalle.** Bei einer Reihe von Körpern, insbesondere bei Azoxyanisol und Azoxyphenetol können sich durch Kondensation des Dampfes zwei verschiedenartige, nicht mit einander mischbare Flüssigkeiten bilden, von welchen die durch Kondensation bei niedrigerer Temperatur entstehende eine eigentümliche innere Struktur besitzt, die schon durch das trübe Aussehen größerer Massen zum Ausdruck kommt. Erwärmt man dieselbe über die sogenannte Umwandlungstemperatur, so geht sie plötzlich in die strukturlose klare Flüssigkeit über, umgekehrt verwandelt sich diese bei Abkühlung unter die Umwandlungstemperatur wieder in die trübe, kristallinische Flüssigkeit. Zur Demonstration dient das Projektionsmikroskop. Man löst die Substanz in der Wärme in einer Spur von geschmolzenem Kolophonium und beobachtet die bei der Abkühlung sich bildenden Tropfen der kristallinisch flüssigen Modifikation, die sogenannten Kristalltropfen oder flüssigen Kristalle. Dieselben erscheinen nicht wie größere Massen trüb, sondern vollkommen klar, verraten aber ihre innere Struktur durch eigentümliche Schlieren, die insbesondere bei Beleuchtung mit punktförmiger Lichtquelle zum Ausdruck kommen, auch dadurch, daß die Tropfen in aufsteigendem Flüssigkeitsstrom, wie er sich bei starker Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite des Präparats ausbildet, alle in gleichem Sinne in Rotation kommen. Fig. 2985 1 zeigt eine Anzahl solcher Tropfen in der ersten Hauptlage, d. h. in solcher Stellung, daß die Symmetrieachse, die als schwarzer Punkt in der Mitte erscheint, zur Bildebene senkrecht ist. Einzelne

[1]) Dieser Vorschlag war hier in der sechsten Auflage des Buches (1889) gemacht. Inzwischen ist die Bezeichnungsweise allgemein üblich geworden. Vgl. auch O. Masson (Beibl. 15, 322, 1891).

Fig. 2985.

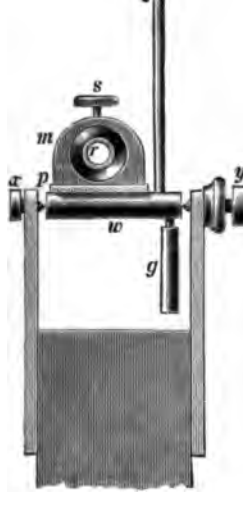


Flüssige Kristalle.

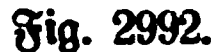
einen Röhre zunimmt, zum Rollen, der Zeiger dreht sich. Wechselt man mittels einer geeigneten Hahnkombination die Wasserströme, so bewegt sich der Zeiger um ebensoviel nach entgegengesetzter Richtung.

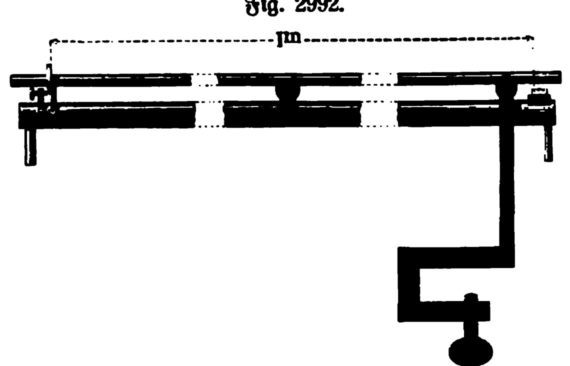
400. Ausdehnungskoeffizient. Zur Messung benutze ich eine Eisenröhre und eine Messingröhre von etwa 2 m Länge und 2 cm Durchmesser, vertikal nebeneinander auf schwerem Fuß, über welche ein etwa 1 m langer, mit beiden Röhren durch Scharniere verbundener Zeiger aus leichtem Holz gelegt ist. Die Verschiebung des Zeigers ist fast doppelt so groß, wenn man durch die Messingröhre Dampf, durch die Eisenröhre kaltes Wasser leitet, als im umgekehrten Falle. Läßt man durch beide Röhren Dampf strömen, so ergibt die Bewegung des Zeigers die stärkere Ausdehnung des Messingrohres.

Fig. 2991.



Ist L die Länge des Messingrohres, t die Temperaturerhöhung, d die Verlängerung, α der Ausdehnungskoeffizient, b die Senkung der Zeigerspitze, a das kurze Ende des Zeigers, l dessen ganze Länge, so ist:


Fig. 2992.



$$d = L\alpha t \quad \text{und} \quad d = b \cdot a/l,$$

$$\text{somit:} \quad \alpha = \frac{a \cdot b}{L \cdot l \cdot t}.$$

Es war bei einem Versuch: $l = 130$ cm, $a = 3$ cm, $b = 20$ cm, $L = 230$ cm, $t = 90^0$, somit:

$$\alpha = \frac{3 \cdot 20}{230 \cdot 130 \cdot 90} = 2{,}22 \cdot 10^{-5} \text{ für Messing.}$$

Für das Eisenrohr bei kalt gehaltener Messingröhre ergab sich ebenso:

$$\alpha = \frac{3 \cdot 13}{230 \cdot 130 \cdot 90} = 1{,}45 \cdot 10^{-5} \text{ für Eisen.}$$

Merkelbach (Z. 5, 233, 1892) benutzt die Zeigerwalze. Das Rohr r liegt, wie aus Fig. 2991 zu ersehen, nicht unmittelbar auf der Walze w auf, sondern mit einer daran angeklemmten mattgeschliffenen Messingplatte. Die Walze bewegt sich zwischen den Spitzen x und y und der Zeiger z ist durch ein Gegengewicht äquilibriert[1].

Fig. 2992 (E, 115) zeigt einen anderen Apparat, bei welchem auf die von Dampf oder kaltem Wasser durchflossene Röhre ein Meterstab aufgesetzt wird, welcher

[1]) Der Apparat ist zu beziehen zu 25 Mk. von Mechaniker H. Schephing in Kassel. Über eine Verbesserung des Apparates siehe Fr. C. G. Müller, Z. 9, 161, 1896.

mittels eines Zeigers auf einer kleinen Skala die Verlängerung angibt. Am besten würde dieser Meterstab aus Nickelstahl[1]) mit 27 proz. Nickelgehalt (zu beziehen von Krupp in Essen), dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient gleich Null ist, hergestellt.

Zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten mit Stäben kann man etwa eine Röhre wie Fig. 2993 machen lassen, in welche man gleich lange Stäbe mittels Kork einsetzt; die Röhre füllt man nachher mit Wasser und so kann man nach und nach verschiedene Metalle anwenden, und dadurch, daß man das Wasser in den Röhren jedesmal bis zum Sieden erhitzt, die ungleiche Ausdehnung verschiedener Metalle zeigen.

Kompliziertere Apparate zur Messung des Ausdehnungskoeffizienten sind die von Reusch (Müller) und Ramsden. Bei ersterem ist der Stab in einem Blechtrog auf hölzernem Stativ angebracht und die Ausdehnung wird gemessen durch die Verschiebung eines Lichtzeigers, welcher von einem beweglichen Spiegel reflektiert wird. (W, 60.) Bei dem Ramsdenschen Apparat werden die Teile eines Mikroskops gegeneinander verschoben. (W, 700.) Der Apparat von Lavoisier

Fig. 2993.

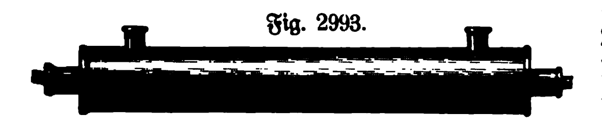


Fig. 2994.

Fig. 2995.



und Laplace (W, 250) mag nur kurz erwähnt werden, ebenso der von Tyndall (zu beziehen von Elliott Brothers, London, Strand 449, zum Preise von 4 Pfund Sterl.). Der letztere ist mit Spiegelvorrichtung ausgestattet und so empfindlich, daß eine leise Berührung des Metallstabes mit dem Finger eine Verschiebung des Lichtzeigers um 3 bis 4 m bewirkt.

Um die Ausdehnungskoeffizienten mit einem kompendiösen Apparat leicht vergleichen zu können, hat Stöhrer den in Fig. 2994 dargestellten Apparat konstruiert, welcher an den Fühlhebelapparat von R. Fueß erinnert, der von Glatzel (1876) zu messenden Versuchen benutzt wurde[2]). Auf dem Boden eines um seine Achse drehbaren Blechgefäßes, welches mit Wasser gefüllt und mit Thermometer und Rührer versehen wird, sind sechs Metallstäbe von verschiedenem Material und je

[1]) Nach Guillaume ist bei 35,7 Proz. Nickelgehalt der Ausdehnungskoeffizient am kleinsten, nämlich nur $1/_{18}$ desjenigen von gewöhnlichem Stahl. — [2]) Bei dem Apparate Fig. 2994 darf die Skala kein Kreisbogen sein (siehe K. Fuchs, Z. 16, 342, 1903).

10 cm Länge befestigt. Dieselben sind derart justiert, daß sie bei 20° C. genau gleiche Länge haben. Bei dieser Temperatur wird mittels einer Justierschraube e der Zeiger des doppelten Fühlhebels auf den Nullpunkt der Gradeinteilung eingestellt. Erwärmt man nun das Wasser durch eine unter den seitlichen Fortsatz des Gefäßes gestellte Lampe, so verschiebt sich der Fühlhebel, dreht man hierauf das Gefäß, so daß nacheinander die verschiedenen Stäbe in Kontakt mit dem Fühlhebel kommen, so zeigt sich, daß dieselben sich in verschiedener Weise verlängert haben[1]).

Fig. 2996.

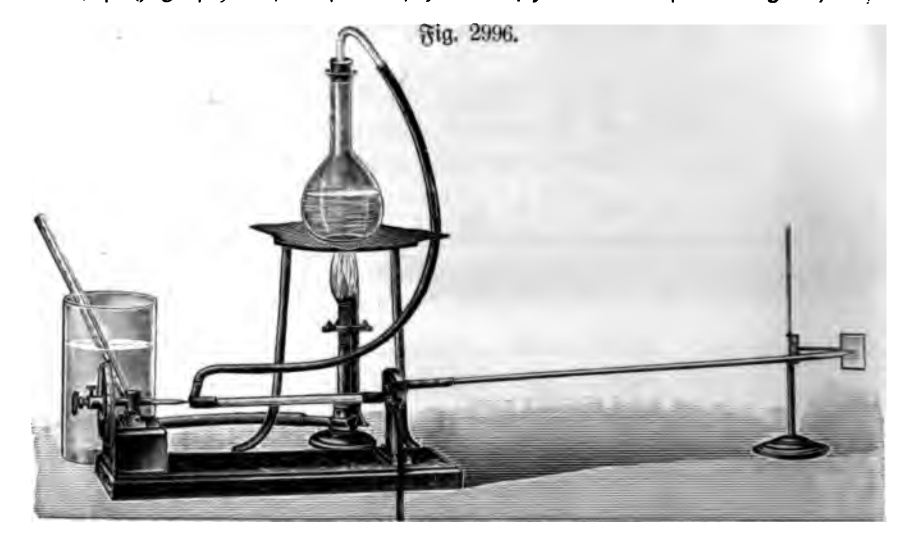
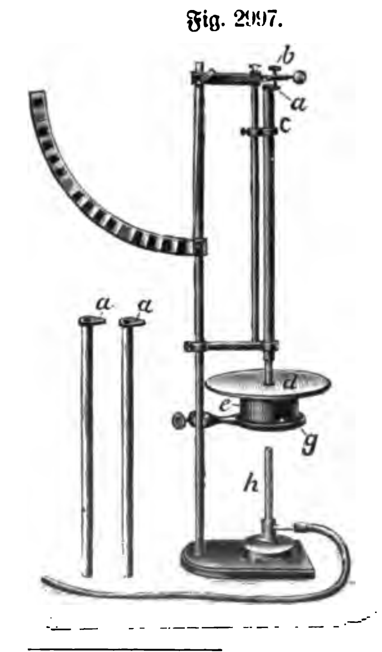


Fig. 2997.



Meiser u. Mertig, Dresden-N., liefe[rt] den in Fig. 2997 dargestellten Apparat mit d[em] kleinen Dampfkessel g und der Glimmer[…] scheibe d zu 18 Mk. Der Dampf durch[…] die röhrenförmigen zu untersuchenden Rö[…]

Beispiele von Ausdehnungskoeffizienten f[…]

Aluminium	0,000 028
Blei	0,000 029
Eisen	0,000 012
Kupfer	0,000 017
Messing	0,000 019
Platin	0,000 009
Schwefel	0,000 070
Silber	0,000 019
Zink	0,000 029
Zinn	0,000 023
Glas	0,000 007
Holz	0,000 006
Ebonit	0,000 080
Porzellan	0,000 003
Quarz ⊥ / ∥ Achse	0,000 0 13 / 07

[1]) Voluminöser und nur für zwei Metalle anwendbar ist der Apparat nach Dulo[ng] u. Petit. (W, 150.) Einen einfacheren Apparat ähnlicher Konstruktion zeigt Fig. 2[…] (E, 30). Die in Fig. 2996 dargestellte Abänderung des Fühlhebelapparates lief[ert] Leppin u. Masche, Berlin SO., Engelufer 17, zu 66 Mk.

Zur Beobachtung des Unterschiedes zweier Ausdehnungskoeffizienten dient der Apparat Fig. 2998, welcher für Projektion eingerichtet ist[1]). Zwei Stäbe (Zink, Kupfer) ruhen auf Regulierschrauben in senkrechter Stellung. Die oberen, mit kleinen Hartgummitellern versehenen Teile der Stäbe drücken gegen Membranen. Diese Membranen bilden den Verschluß von kleinen Flüssigkeitsbehältern. Sobald die geringste Dehnung des Metalles erfolgt, steigt die gefärbte Flüssigkeit in einem Glasröhrchen. Die Flüssigkeitssäulen werden bei Beginn des Versuches mittels der unteren Schrauben eingestellt auf gleiche Höhe, der ganze Apparat alsdann in ein Gefäß mit warmem Wasser getaucht. Die Höhen der Flüssigkeitssäulen sind jetzt verschieden. Um jedem Einwand zu begegnen, sind die Stäbe so befestigt, daß dieselben leicht ausgewechselt werden können. Auf Wunsch werden Stäbe aus anderen Metallen (Silber, Eisen u. dergl.), je nach Metallwert berechnet, beigefügt.

Fig. 2998.

Fig. 2999.

Fig. 3000.

[1]) Zu beziehen von Dr. Stöhrer u. Sohn, Leipzig, zu 14 Mk. Vgl. auch K. Fuchs, Z. 16, 342, 1903. Einen nicht für Projektion bestimmten Apparat zeigt Fig. 2999 (E, 85). Fig. 3000 (K, 210) zeigt einen Apparat mit Mikrometerablesung. Als Versuchsobjekte dienen 0,5 m lange Stäbe von Eisen, Kupfer, Zink, Messing, Glas und Aluminium. Am Mikrometer werden direkt 0,01 mm abgelesen.

401. **Kraft der Kontraktion.** Die große Gewalt mit welcher die Wiederzusammenziehung erhitzter Körper erfolgt, kann man durch folgenden Versuch zeigen. *AB*, Fig. 3001, ist ein gußeisernes Gestell mit zwei Lagern, von welchen *B* zwei hervorragende Prismen trägt. In diese Lager legt man die schmiedeeiserne Stange *C*, welche einerseits einen Ring *D* hat, der in der Mitte seiner Höhlung prismatisch zugeschärft ist; anderseits endigt die Stange in die grobgängige Schraube *E*. Wenn die glühende Stange in das Gestell gelegt ist, schiebt man das gußeiserne Stäbchen *ab*, Fig. 3002, durch den Ring und schraubt die Mutter *FF* auf, so daß

Fig. 3001.

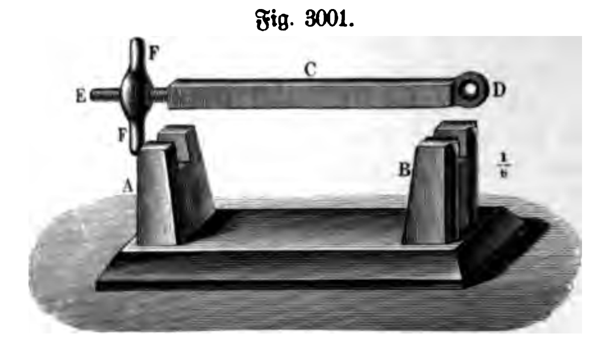
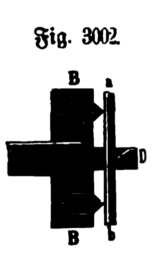


Fig. 3002.



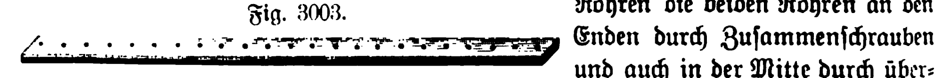
die glühende Stange zwischen *AB* gespannt ist. Da eine Schraube im heißen Zustande nicht gern geht und die Mutter ohnehin bald heiß wird, so muß letztere mit dem Hammer fest angetrieben werden. Das Stäbchen *ab* wird unter scharfem Knacken gebrochen. Die Abkühlung kann man durch Aufgießen von kaltem Wasser beschleunigen.

Hier wäre ferner zu erwähnen die Ausdehnung unter konstantem Drucke oder Zug, die Abhängigkeit der Elastizität von der Temperatur u. s. w.

402. **Ausdehnung der Kristalle.** Man kann insbesondere erwähnen, daß nicht nur eine Abhängigkeit der Ausdehnungskoeffizienten von der Richtung sich zeigt, sondern daß unter Umständen nach einer Richtung Ausdehnung, nach einer andern Kontraktion erfolgt, somit dazwischen eine Richtung mit dem Ausdehnungskoeffizienten 0 liegen muß. Jedenfalls ist die thermische Ausdehnung der Kristalle eine solche, daß Flächen, die parallel waren, es auch bei der Erwärmung bleiben und daß drei sogenannte thermische Achsen existieren, welche bei jeder Temperatur ihre Rechtwinkligkeit bewahren. Bei zweiachsigen Kristallen ändern sich die Winkel, also auch die Achsenelemente, mit der Temperatur.

403. **Krümmung durch Ausdehnungsverschiedenheiten.** Würde man bei dem S. 1118 besprochenen Apparate zur Demonstration der Ausdehnung mittels zweier Röhren die beiden Röhren an den Enden durch Zusammenschrauben und auch in der Mitte durch übergeschobene Ringe verbinden, so würde sich das System, wie durch einen am Ende befestigten langen leichten Zeiger nachgewiesen werden könnte, krümmen. Gewöhnlich wird ein Doppelstab benutzt wie Fig. 3003.

Fig. 3003.



Man nietet einen etwa 2 cm breiten, 30 cm langen und 2 mm dicken Streifen von Eisen mit einem gleichen Streifen von Messing oder Zink mittels von 2 zu 2 cm

gesetzter Nieten zusammen oder lötet sie zusammen, Fig. 3003. Ist der so zugerichtete Streifen bei gewöhnlicher Temperatur gerade, so krümmt er sich sehr merklich bei nur mäßiger Erhitzung über der Weingeistlampe. Daß ein vorher gerader Streifen krumm geworden sei, ist leichter zu beobachten, als daß ein krummer weniger krumm geworden sei; darum ist das Nieten dem Löten vorzuziehen, obwohl es umständlicher ist, weil man beim Löten Streifen erhält, welche bei gewöhnlicher Temperatur ansehnlich krumm sind.

Ferner beruht auf gleichem Prinzip das Öffnen und Schließen des in Fig. 3004 dargestellten aufgeschlitzten Doppelringes (Lb, 6,50).

Um die Krümmung des Doppelstabes deutlich hervortreten zu lassen, befestigt man ihn in senkrechter Stellung in ein Stativ und bringt am oberen Ende einen langen Zeiger an.

Fig. 3004.



Fig. 3005.

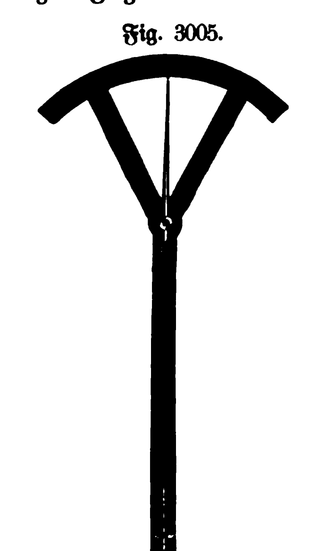


Fig. 3006.



404. Metallthermometer. Ein einfaches, wenig empfindliches Metallthermometer, beruhend auf der Krümmung eines geraden, aus Eisen und Zink bestehenden Stabes nach Stöhrer zeigt Fig. 3005 (E, 12,50). Man kann bei demselben in übersichtlicher Weise die Wirkung durch Bestreichen mit einer Flamme demonstrieren.

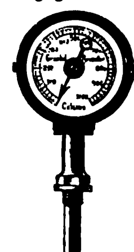
Michelson (1882) stellt ein empfindliches Thermometer dadurch her, daß er eine dünne Scheibe von Hartgummi mit einer großen dünnen Kupferscheibe verbindet, wodurch sich beide bei Temperaturerhöhung nach der Seite der sich stärker ausdehnenden Kautschukscheibe ausbiegen, welche Bewegung dann durch einen feinen Hebel aus Glas auf einen Spiegel übertragen wird und sich durch eine Verschiebung des von dem letzteren reflektierten Lichtbündels kundgibt.

Hartl (1891) beschreibt ein Wagethermometer in Form einer zweiarmigen Wage mit gekrümmten Wagebalken, welche aus Zink- und Eisenstreifen gebildet sind und sich bei Temperaturerhöhung derart deformieren, daß das Gleichgewicht gestört wird, somit der Zeiger der Wage die Temperaturerhöhung erkennen läßt.

Ein sehr empfindliches Metallthermometer ist **Brequets Thermometer**[1]), mit Spirale aus drei Metallen bestehend. Fig. 3006 (K, 46).

Nach W. Holtz (1886) kann man sich ein solches Thermometer leicht selbst machen aus einem aus Platin und Silber zusammengewalzten Streifen von etwa 130 cm Länge, 2 mm Breite und 0,02 mm Stärke. Dieser Streifen ist um ein Glasröhrchen oder einen Stahldraht von 2 bis $2^1/_2$ mm Durchmesser spiralig aufgewickelt. Als Stativ dient ein gebogener Messingstreifen, an welchen unten ein Messingring als Fuß angelötet ist. Oben hat der Messingstreifen eine Öffnung, in welcher sich ein Kork drehen kann, in welchem die Spirale nebst dem Glasstabe befestigt sind. Als Zeiger dient ein Aluminiumdraht oder dünner Eisendraht von 25 cm Länge, mit Papierfähnchen am Ende. Für Experimente mit strahlender Wärme erhält die Spirale einen Anstrich mit chinesischer Tusche. Wird dies Thermometer unter einen Luftpumpenrezipienten gestellt und die Luft, wenn auch nur schwach, komprimiert oder dilatiert, so zeigt es die Temperaturänderungen sehr auffällig [2]).

Fig. 3007.



Bei den **Graphit-Thermometern und -Pyrometern**[3]) wird die Temperatur angegeben durch einen Zeiger, welcher mit einem Graphitstabe in Verbindung steht, der frei in dem metallenen Eintauchrohre herabsteigt und unten mit demselben fest verbunden ist. Oben trägt das Metallrohr das Gehäuse mit Skala. Wenn die Temperatur steigt, dehnen sich Graphitstab und Metallrohr in verschiedener Weise aus und infolgedessen muß sich der Zeiger verschieben.

405. Metall-Maximum- und Minimumthermometer. Bei dem häufig zur Kontrolle der Heizung in Lehrsälen u. s. w. angebrachten Instrumente von Hermann u. Pfister in Bern (Preis 32 bis 40 Fr.) sind drei Zeiger angebracht, von welchen der mittlere die Fortsetzung einer aus zwei Metallen von verschiedener Ausdehnung bestehenden, vernickelten Spirale bildet und auf der dahinter befindlichen Skala die momentane Temperatur anzeigt (Fig. 3008). Die beiden seitlichen Zeiger sind isoliert und mit geringer Reibung verschiebbar. Man schiebt sie jeweils abends

---

[1]) Zu beziehen von W. Niehls, Berlin N., Schönhauserallee 168. — [2]) **Metallthermometer** liefern: Institut f. elektr. Kontrollapp., München, Schnorrstraße 30; E. Loewe, Präzisionsmechaniker u. Optiker, Zittau i. S.; W. Niehls, Glasinstrumentenfabrik, Berlin N., Schönhauserallee 168; G. A. Schulze, Glasinstrumentenfabrik, Berlin SW., Schönebergerstraße 4; Wegener u. Mach, mech. Werkst., Quedlinburg; Zabel u. Co., Metallwarenfabrik, Quedlinburg, Provinz Sachsen. Ein kleines Metallthermometer nach Tremeschini in Taschenuhrform liefern Dr. Houdek u. Hervert in Prag zu 20 fl. Im allgemeinen stehen alle Metallthermometer und insbesondere Pyrometer den Flüssigkeits- und Luftthermometern nach. Weinhold (1873) fand z. B. bei Prüfung eines Pyrometers von Gauntlett (1860) (Stahl und Kupfer) bei Vergleich mit dem Luftthermometer Differenzen bis 182° bei Erhitzung bis 500°, welche außerdem nicht konstant waren, sondern sich mit der Zeit und mit der Schnelligkeit der Temperaturänderungen änderten. — [3]) Die Instrumente werden von Steinle u. Hartung in Quedlinburg gebaut, entweder nur für niedrige Temperaturen (bis 100°) oder auch für höhere (im Maximum bis 1000°). Dieselben scheinen in der Technik vielen Beifall gefunden zu haben. (Preise 62 bis 90 Mk.) Sie sind auch zu beziehen von E. Sonnenthal, Berlin C., Neue Promenade 6, zu 75 bis 104 Mk. (Fig. 3007).

rgens gegen den mittleren Zeiger bis fast zur Berührung. Bewegt sich ser im Laufe des Tages nach der einen oder anderen Seite, so stößt er betreffenden Zeiger an und schiebt ihn fort. Beim Rückgang des Mittel- behält aber der Nebenzeiger seine Lage utet somit auf der Skala die extremste an, bis zu welcher der mittlere Zeiger men ist. Die beiden Nebenzeiger lassen rkennen, welches die höchste und niedrigste eratur im Verlaufe des Tages war. Eine re Form zeigt Fig. 3009 (Lb, 50).



Fig. 3008.



Fig. 3009.

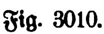
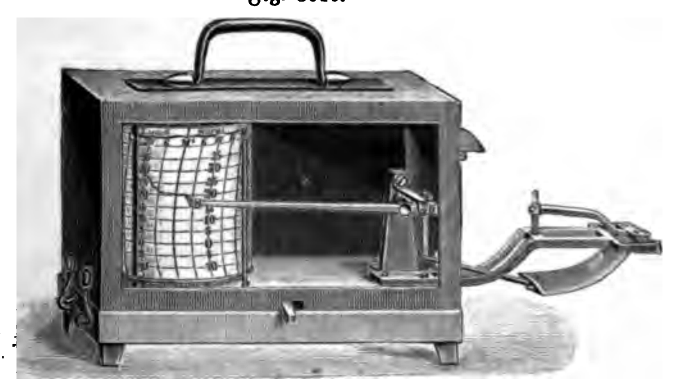


Fig. 3010.



406. Metallthermograph ist ein Metallthermometer, kombiniert mit einem Uhrwerk, welches letztere einen Papierstreifen in Bewegung setzt, auf dem der Zeiger des Thermometers alle zehn Minuten automatisch die Temperatur verzeichnet [1]) (Fig. 3010 Lb, 135).

---

[1]) Das Lamellenthermometer von Hergesell (meteorologische Zeitschrift 17, 1, 1900) besteht aus einem Streifen von Neusilberblech von weniger als 1/10 mm Dicke, der in einen Block von Nickelstahl gespannt ist. Die Ausdehnung wird durch ein Hebelsystem 200 Mal vergrößert auf eine Trommel aufgezeichnet.

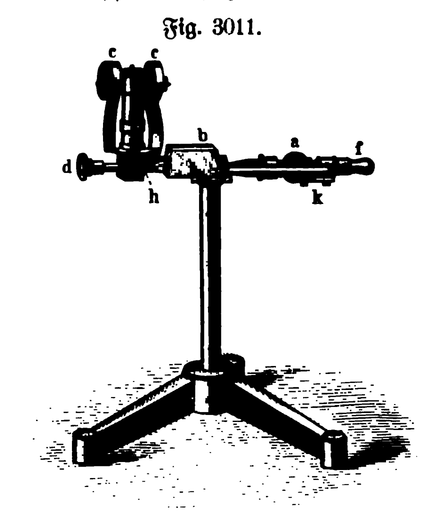
407. Temperatureinfluß auf Maßstäbe. Zu erwähnen wäre hier auch die Barometer- und Manometerkorrektion, bedingt durch die Längenänderung der Skala mit der Temperatur, die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Temperatur bei Herstellung und Vergleichung von Maßstäben u. s. w.

Ein Maßstab ist natürlich streng genommen nur richtig für die Temperatur, bei welcher er hergestellt wurde, welche seine Normaltemperatur genannt wird.

Beim gewöhnlichen Barometerstand beträgt die vollständige Korrektion (mit Rücksicht auf die Ausdehnung des Quecksilbers) nahe $^1/_8$ mm pro Grad, so daß man also von dem beobachteten Stande $^1/_8 . t$ mm abzuziehen hat [1]).

408. Temperaturregulatoren, beruhend auf der Ausdehnung und Zusammenziehung fester Körper. Der Regulator von Bonnemain (1825) enthält eine Eisenstange, durch deren Längenänderung ein Hebelwerk in Bewegung gesetzt wird, welches die Klappe des heizenden Ofens je nach dem Sinne der Temperaturüberschreitung öffnet oder schließt. Bei dem Apparate von Ure (1831) wird in ähnlicher Weise die Krümmung eines aus zwei verschiedenartigen Metallen zusammengenieteten Stabes (das zuerst von Martin eingeführte Prinzip) benutzt. Robert Koch verwendet das gleiche Prinzip, aber einen spiralförmig, nach Art eines Metallthermometers gewundenen Stahlstreifen zur selbsttätigen Schließung von Gashähnen. Eine Lampe mit solchem Gashahn (Fig. 3011) wurde konstruiert von R. Muencke (1884). Die mit ihren centralen Enden an der Brenneröffnung festsitzenden entgegengesetzt gestellten Spiralen *c* greifen mit ihren freien Enden in ein bewegliches, T-förmig gestaltetes Metallstück *h* ein, welches der durch die Temperaturveränderungen bedingten Bewegung der Spiralen folgt und schließlich dem Hebelarme *b* während des Brennens als Stütze dient. So lange die Spiralen erwärmt bleiben, liegt demnach auf *h* der beschwerte Hebelarm *b*, welcher mit dem Hahngriffe *k* des Gasleitungshahnes *a* fest verbunden ist und dessen wagerechte Stellung der Bohrung dieses Hahnes entspricht. Verlöscht die Flamme, so bewegt sich *h* in entgegengesetzter Richtung. Der durch dasselbe unterstützte Hebelarm *b* wird frei und stellt sich lotrecht ein, d. h. er verschließt die Gaszuleitung. Wird jede Gaslampe, die Tag und Nacht hindurch ohne Aufsicht brennen soll, mit einer solchen Kochschen Vorrichtung versehen, so ist man sicher, daß nach dem durch irgend welche Ursache bedingten Verlöschen der Flamme der Gaszutritt zu jeder Lampe selbsttätig abgeschlossen ist. Der Schraubhahn *d* dient zur Regulierung der Flamme. Damit letztere nicht durch einen Luftzug zum Verlöschen gebracht werden kann, wird sie noch mit einem Glimmercylinder umgeben. (M, 21,5 bis 39,5.)

Fig. 3011.



Muencke konstruierte nach gleichem Prinzip auch eine Vorrichtung, welche selbsttätig die Leitung eines ganzen Zimmers schließt, wenn etwa durch Zudrehen des Haupthahnes alle Flammen ausgelöscht werden. (M, 25,5 bis 45.)

[1]) S. a. Kohlrausch, Lehrbuch d. prakt. Physik, 9. Aufl., 1901, S. 133.

Kipp (1868) verwendet einen V-förmig gekrümmten Martinschen Stab, welcher auf ein Ventil wirkt, das den Gaszufluß regelt. In ähnlicher Weise ist auch der Apparat von Rieth (1871) konstruiert.

Der Regulator von v. Babo (1880) besteht aus einer beiderseits geschlossenen Kupferröhre, an deren einem Ende hintereinander die Ein- und Ausströmungsröhren des Gases angebracht sind. Das Gas tritt also durch die eine dieser Ansatzröhren ein, passiert ein kurzes Stück der Kupferröhre und tritt dann zum anderen Ansatzröhre wieder aus. In diesem Stück der Kupferröhre befindet sich nun eine Scheidewand mit Kegelventil, welches durch eine zwischen es selbst und das Ende der Röhre eingeklemmte Spiralfeder fest an seinen Sitz angedrückt wird, so daß das Gas ohne weiteres nicht passieren kann. Um dies zu ermöglichen, ist in der Achse der Röhre ein Glasstab gelagert, welcher mittels einer durch das andere Ende der Kupferröhre axial luftdicht durchgeführten Griffschraube vor- und zurückgeschoben werden kann. Schraubt man denselben genügend vor, so stößt er an das Ventil an und öffnet dasselbe, der Durchgang des Gases ist also ermöglicht. Steigt sodann allmählich die Temperatur, so dehnt sich die Kupferröhre stärker aus als der Glasstab und schließlich wird die Verschiebung des letzteren mittels der Schraube zum Öffnen des Ventils gerade kompensiert durch den Überschuß der Verlängerung des Kupferrohres über die des Glasstabes, das Ventil schließt sich also wieder, die Flamme verkleinert sich, die Temperatur sinkt, das Ventil öffnet sich wieder u. s. w.

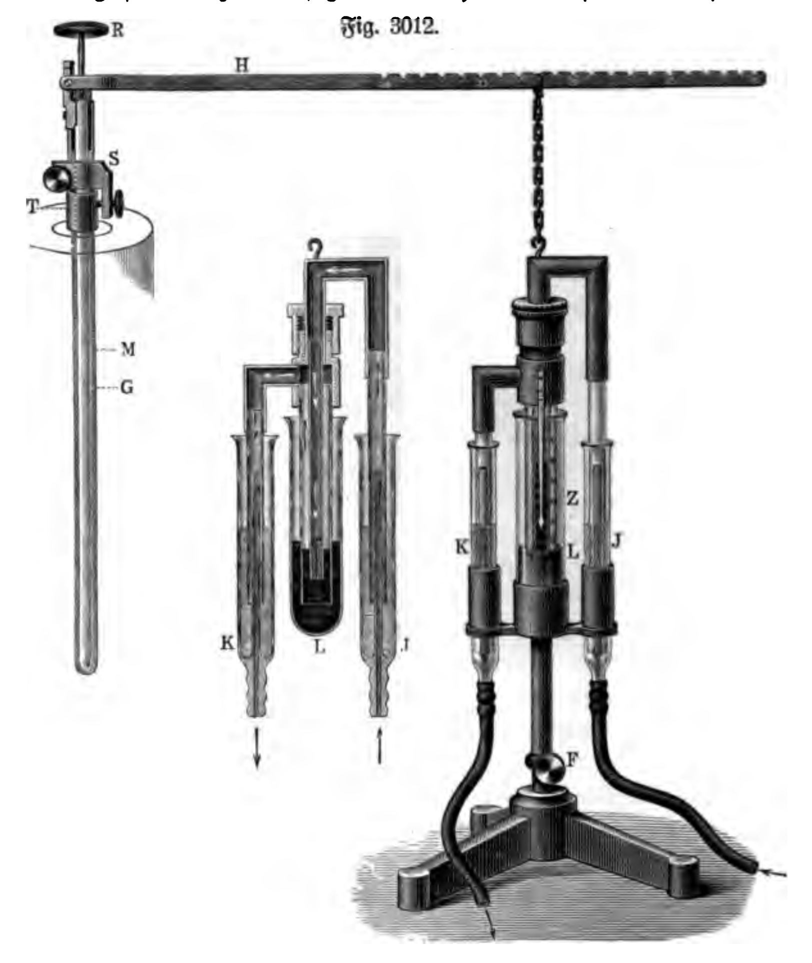
Noch weiter verbessert ist dieser Apparat von Lothar Meyer. Ich gebe die Beschreibung desselben nach dem Kataloge des Mechanikers Bühler in Tübingen, von welchem der Apparat zu beziehen ist. (Preis 25 Mk.)

In dem senkrecht hängenden, 30 cm langen Messingrohre *M*, Fig. 3012, welches an dem Tubus des Luftbades festgeklemmt wird, steckt der Glasstab *G*, oben mit einer Messingkappe versehen, aus welcher beiderseits ein kleiner Stift wagerecht hervorragt. Auf diesen Stiften ruht 0,5 cm von seiner Drehungsachse der an diesem Ende gabelförmige, 40 cm lange Hebel *H*, welcher von seiner Mitte an bis ans Ende mit je 1 cm auseinander liegenden Einschnitten versehen ist. In letztere greift der Haken einer Kette ein, an welcher ein aus Glas und Messing hergestellter, dem oberen Teile des Kemp-Bunsenschen Regulators nachgebildeter Apparat hängt, dessen Einrichtung in der Figur leicht zu ersehen ist. Der an der Kette hängende Teil des Apparates ist ohne Reibung frei beweglich und seine Verschiebungen können mittels des Zeigers *Z* an einer auf das mittlere Glasrohr *L* eingeätzten Millimeterskala abgelesen werden. Dieses Rohr *L* ist mit *J* und *K* zusammen in eine auf einem Träger *F* verstellbare Fassung eingesetzt und enthält Quecksilber, in welches das untere, aus einem dünnen mit einem feinen Schlitze versehenen Eisenröhrchen gebildete Ende des Gaszuleitungsrohres eintaucht, das je nach seiner Stellung durch den seitlichen Schlitz mehr oder weniger Gas ausströmen läßt. Das Gas tritt in der Richtung der Pfeile durch zwei nach Art der Wasserzüge beweglicher Gaslampen eingerichtete, mit Glycerin oder konzentrierter Chlorzinklösung gesperrte Glasröhrchen *JK* aus der Leitung ein und zum Gasbrenner aus.

Die Wirkungsweise des Apparates ist folgende: Stellt man den Träger *F* und mittels der Schraube *R* den Hebel *H* so, daß der Schlitz zum größten Teile aus dem Quecksilber hervorragt und entzündet das durch den beschriebenen Regulierapparat zum Luftbade strömende Leuchtgas am Brenner desselben, so wird in dem Maße, als sich das Rohr *M* erwärmt, der Glasstab *G* relativ verkürzt. Der auf

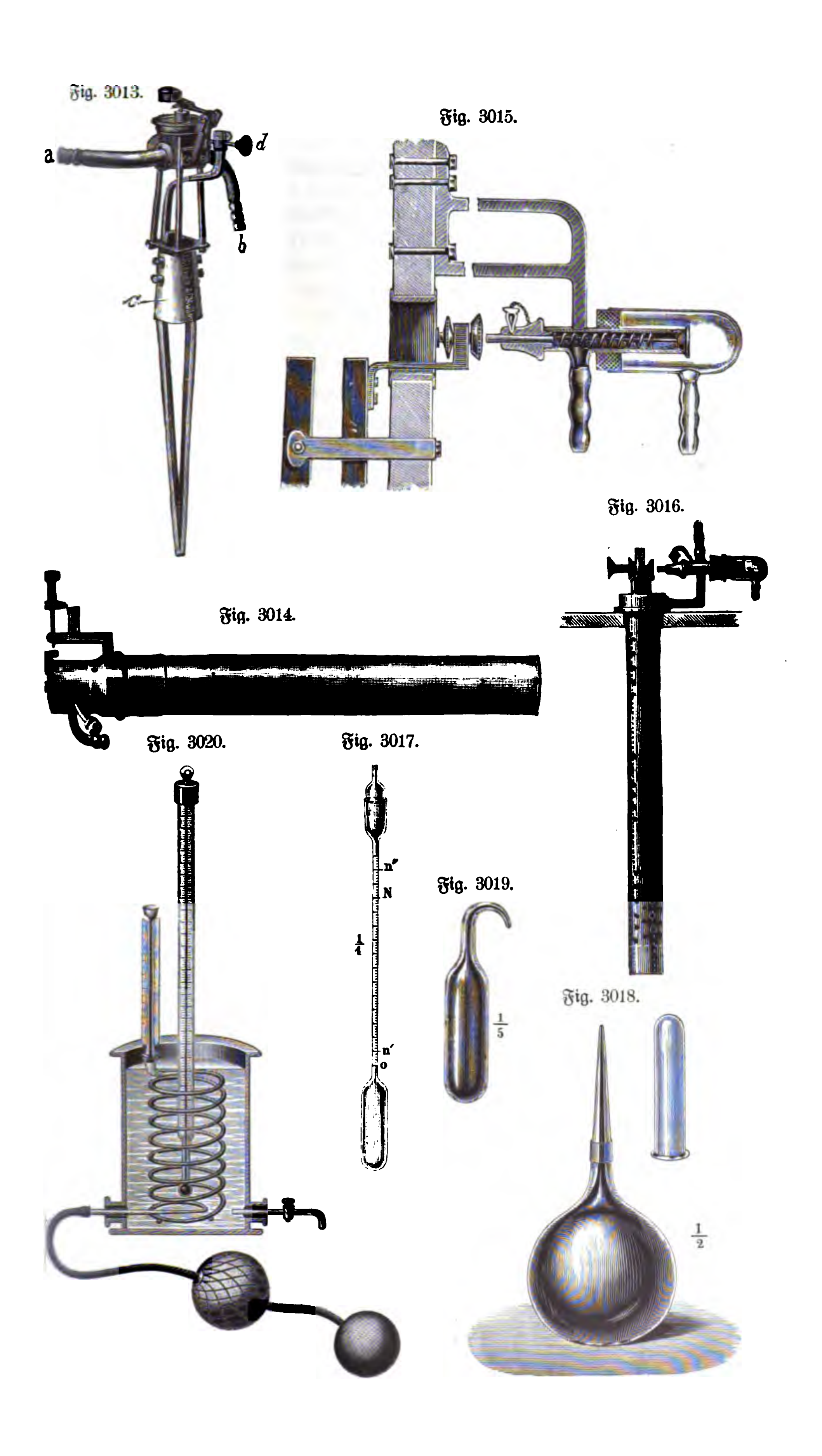
seiner Kappe ruhende Hebel sinkt und mit ihm auch der an ihm hängende Regulierapparat, so daß der eiserne Schlitz tiefer in das Quecksilber eintaucht und weniger Gas durchströmen läßt. Durch Drehen der die Kappe des Glasstabes durchsetzenden feinen Schraube *R* hebt man die Kappe und damit auch den Hebel wieder, bis die Temperatur des Luftbades der gewünschten Grenze bis auf etwa 10 bis 20° nahe gekommen ist. Alsdann wird durch Rückwärtsdrehen der Schraube *R* der Gaszufluß auf das äußerste Minimum eingeschränkt. Damit derselbe nicht ganz aufhören könne, gießt man zweckmäßig in die Röhre *L* nur soviel Quecksilber, daß der

Fig. 3012.



Spalt noch nicht ganz eintaucht, wenn die Messingfassung des Zuleitungsrohres schon auf den oberen Rand des Glases *L* aufstößt, so daß das Rohr nicht weiter einsinken kann. Durch feines Einstellen der Schraube *R* läßt sich schließlich die gewünschte Temperatur genau erreichen [1].

[1]) Einen Normal-Thermoregulator nach Fig. 3013 liefern **J. Klönne u. G. Müller**, Berlin, Luisenstr. 49. Fig. 3014 zeigt einen Thermoregulator nach **Roux**, zu beziehen von Dr. H. Rohrbeck, Berlin NW., Karlstr. 20a, zu 60 Mk., beruhend auf der Ausdehnung verschiedener Metalle. Fig. 3015 zeigt die innere Einrichtung eines nach ähnlichem Prinzip konstruierten Regulators derselben Firma (Preis 60 Mk.), Fig. 3016 die Gesamtansicht des letzteren Apparates.


Fig. 3013.
a
d
b
c
Fig. 3015.
Fig. 3016.
Fig. 3014.
Fig. 3020.
Fig. 3017.
n''
N
1/4
n'
o
Fig. 3019.
1/5
Fig. 3018.
1/2

409. Dilatometer. Zur Bestimmung der Ausdehnung der Flüssigkeiten benutzt man thermometerartige Gefäße, sogenannte **Dilatometer**, welche zweckmäßig mit Einfülltrichter mit Hahn, sowie mit einem seitlichen Rohre zur Verbindung mit der Luftpumpe zur Beseitigung von Luftblasen verbunden sind (Fig. 3017 E, 12). Einfacher ist das in Fig. 3018 (Lb, 3) dargestellte Dilatometer.

Fig. 3022.

Würde man das Gefäß auf 0° erkalten, alle Flüssigkeit bis an das Zeichen entfernen, dann das Gefäß wägen, nachher in Wasser bis zu einem gewissen Grade erwärmen, die aufgestiegene Flüssigkeit wieder entfernen, das Gefäß wieder wägen und von beiden Wägungen das vorher bestimmte Gewicht des leeren Gefäßes abziehen, so erhielte man die scheinbare Ausdehnung der Flüssigkeit. Der Unterschied gegen die wirkliche Ausdehnung ergibt die Ausdehnung des Glases, welche also auf diesem Wege berechnet werden kann.

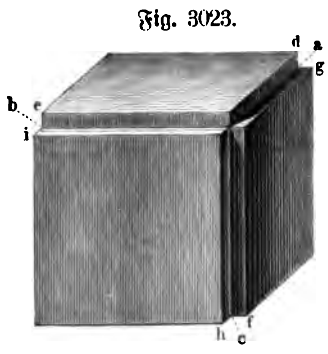
Fig. 3021.

Zu letzterem Zweck dient insbesondere die Beobachtung der Ausflußmenge des Quecksilbers beim Ausflußthermometer (Fig. 3019 Lb, 2,50).

Plücker machte darauf aufmerksam, daß, wenn in ein Dilatometer eine bestimmte geringe Quecksilbermenge eingebracht wird, der noch übrige Hohlraum sich mit der Temperatur nicht ändert, so daß mit einem solchen **kompensierten Dilatometer** direkt die wahre Ausdehnung erhalten wird. Fig. 3020 (E, 40) zeigt ein solches nach **Noack** (Z. 2, 160, 1889). Das angebrachte Kautschukgebläse dient zum Umrühren des Wasserbades durch eingepreßte Luft.

Um die scheinbare Kontraktion der Flüssigkeit bei raschem Erwärmen infolge der vorwiegenden Ausdehnung des Gefäßes zu zeigen, benutzt man das thermometerartige Dilatometer Fig. 3021 (K, 1,75), indem man die große Kugel rasch mit einer Flamme bestreicht und dabei die Änderung des Flüssigkeitsstandes durch Projektion sichtbar macht. Eine andere Dilatometerform zeigt die Fig. 3022 (E, 15).

Fig. 3023.



Hier wäre auch die **Dilatometerkorrektion** wegen der Ausdehnung des Gefäßes zu erwähnen. Der **kubische Ausdehnungskoeffizient fester Körper** ist das Dreifache des linearen[1]), derselbe muß von dem der Flüssigkeit abgezogen werden, um den scheinbaren Ausdehnungskoeffizienten zu erhalten. Ferner wären zu besprechen: die Korrektion beim Gebrauch des Luftthermometers, die Korrektionen bei Bestimmung des spezifischen Gewichts mit Pyknometer und Senkkörper, die Bestimmung eines Gefäßvolumens durch Wägung, die Kalibrierung einer engen Glasröhre, die Druckerhöhung bei konstantem Volumen u. s. w.[2]),

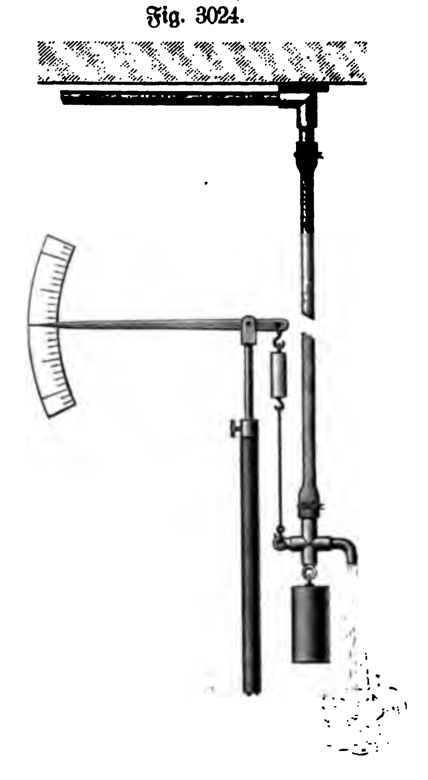
---

[1]) Ein Modell zur Erklärung dieses Satzes zeigt Fig. 3023. Die Seitenflächen des Würfels sind die Flächeneinheit. — [2]) Auch die Abhängigkeit der Temperaturskala von der Glassorte wäre hier zu erwähnen. **Regnault** fand z. B., daß ein Thermometer aus Kristallglas 360,5° zeigte bei einem Wärmegrad, der nach einem Thermometer aus gewöhnlichem Glas 354° betrug, während bei 0° und 100° die beiden Thermometer übereinstimmten.

Korrektion wegen Gefäßausdehnung beim Luftthermometer, die Abhängigkeit der Elastizität, Plastizität und anderer Eigenschaften von der Temperatur u. s. w.[1]).

410. Kontraktion des gespannten Kautschuks durch Erwärmen. Man versieht einen gewöhnlichen Kautschukschlauch von etwa 1,5 m Länge am einen Ende mit einer Winkelröhre, am anderen mit einem T-Rohr aus Messing, an welches man den Schlauch fest anbindet (Fig. 3024). Der Schlauch wird dann vertikal aufgehängt und durch ein an das T-Stück durch einen passenden Haken befestigtes 5 Kilogrammgewicht belastet. Das am oberen Ende angebrachte Winkelrohr verbindet man mit der Dampfleitung oder einem kleinen Dampfkessel, in welchem sich der Dampf durch einen Hahn absperren läßt. Neben dem belasteten Ende stellt man ein Stativ auf, auf welches ein langer Zeiger (dünner Holzstab von etwa 1 m Länge) so aufgelegt ist, daß er sich um einen Punkt nahe dem einen Ende drehen kann. Um denselben im Gleichgewichte zu halten, wird an das kürzere Ende des Hebels ein Gewicht angehängt, welches das Gewicht des langen Hebelarmes gerade äquilibriert. Das Ende des kurzen Armes bringt man nun (durch einen Haken aus Draht u. dergl.) in Verbindung mit dem T-Rohr, so daß eine auch nur geringe Kontraktion dieses Endes durch die Verschiebung des Endes des langen Hebelarmes weithin sichtbar gemacht werden wird. Bevor man den Hebel mit dem Kautschukschlauch in Verbindung setzt, ist es nötig, abzuwarten, bis die Verlängerung des Kautschuks durch die Belastung nicht mehr zunimmt. Ist der Apparat völlig im Gleichgewicht, so öffnet man den Dampfhahn, wobei dann eine starke Kontraktion erfolgt. Sobald dieselbe nicht mehr zunimmt, schließt man den Dampfhahn.

Fig. 3024.



Dvořák benutzt einen horizontal gespannten Schlauch, dessen Mitte mit einem nach Art eines Fühlhebels wirkenden Zeiger verbunden ist. Bei Erwärmung einer Hälfte des Schlauches gibt der Zeiger einen entsprechenden Ausschlag.

Um zu zeigen, daß das Volumen des gespannten Kautschuks ebenso wie das anderer Körper beim Erwärmen zunimmt, bedient sich Lebedew (1881) der Werthheimschen Methode, d. h. ein am einen (unteren) Ende geschlossener, am anderen mit einer engen Glasröhre versehener Kautschukschlauch wird vertikal aufgehängt, belastet und mit Wasser gefüllt. Erwärmt man nun in einem Wasserbade und verfolgt den Stand des Wassers in der angesetzten Glasröhre, so läßt sich hieraus die Volumenvergrößerung des Kautschuks berechnen. Gleichzeitig vermindert sich die Länge des Kautschuks. Als Vorlesungsversuch dürfte das Experiment zu schwierig sein.

[1]) Siehe Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Physik, 9. Aufl., S. 64, 65, 69, 93, 94.

Tait beobachtete, daß Kautschuk gespannt und längere Zeit stark abgekühlt, nicht mehr die frühere Form annimmt. Beim Erwärmen verschwindet diese künstlich erzeugte Starrheit wieder. Man kann das Verhalten des Kautschuks erklären durch das einer zelligen Masse, deren Höhlungen mit einer Flüssigkeit gefüllt sind, welche größeren Ausdehnungskoeffizienten hat als die Wände der Zellen und in niederer Temperatur langsam erstarrt (s. O. Lehmann, Molekularphysik 1888, Bd. I, S. 532).

Zu erwähnen wäre auch die Abhängigkeit der Elastizität anderer Körper von der Temperatur [1]).

411. Zunahme der Löslichkeit mit der Wärme. Ein recht geeignetes Beispiel ist das salpetersaure Ammoniak. Man schüttelt zunächst die bei gewöhnlicher Temperatur gesättigte Lösung mit überschüssigem festem Salz und zeigt so, daß dieselbe nichts mehr aufzunehmen vermag. Erwärmt man nun, so wird das feste Salz immer weniger, schließlich verschwindet es ganz, ja man kann bei fortgesetzter Erhitzung unbegrenzte Mengen von neuem festem Salz allmählich hinzufügen.

Sehr gut läßt sich die Änderung der Löslichkeit bei Anwendung des Kristallisationsmikroskops beobachten. Die Löslichkeitskurven geben eine gute Übersicht über die Änderungen.

Einige Beispiele wässeriger Lösungen sind:

	Chlornatrium	Salpeter	Silbernitrat	Rohrzucker
0°	35,5	13	122	179
18°	36,0	29	220	201
100°	39,6	250	900	490.

Die Zahlen bedeuten die in 100 Gewichtsteilen Wasser gelösten Teile.

Als Demonstrationspräparate benutze ich z. B. α-naphtylaminsulfosaures Natrium, Salmiak, Kalibichromat, Benzoin, Salmiak mit Nickelchlorür und eine Spur Cadmiumchlorid (aus verdünnter Salzsäure), Salmiak mit Eisenchlorid (aus verdünnter Salzsäure) (Fig. 3025, vgl. auch § 198, S. 870), Salmiak mit Kobaltchlorür und einer Spur Cadmiumchlorid (aus Wasser) (Fig. 3032 a, S. 1142), Meconsäure mit Methylviolett, Meconsäure mit Modebraun, Meconsäure mit Safranin, Meconsäure mit Chrysoidin, Meconsäure mit Methylorange, Phtalsäure mit Methylorange, Sulfocarbamid mit Safranin [2]).

Zu erwähnen wäre auch die Reinigung chemischer Präparate durch fraktionierte Kristallisation und die Kristallanalyse [3]). Die Zunahme des osmotischen Druckes mit der Temperatur wird in Kapitel XII besprochen.

412. Chemisches Gleichgewicht. Die Änderung des chemischen Gleichgewichts in Flüssigkeiten mit der Temperatur läßt sich z. B. demonstrieren bei Kobaltchlorürlösung, welche mit etwas Salzsäure angesäuert ist. Beim Erwärmen wird sie dunkelblau, während beim Abkühlen die rosenrote Farbe zurückkehrt.

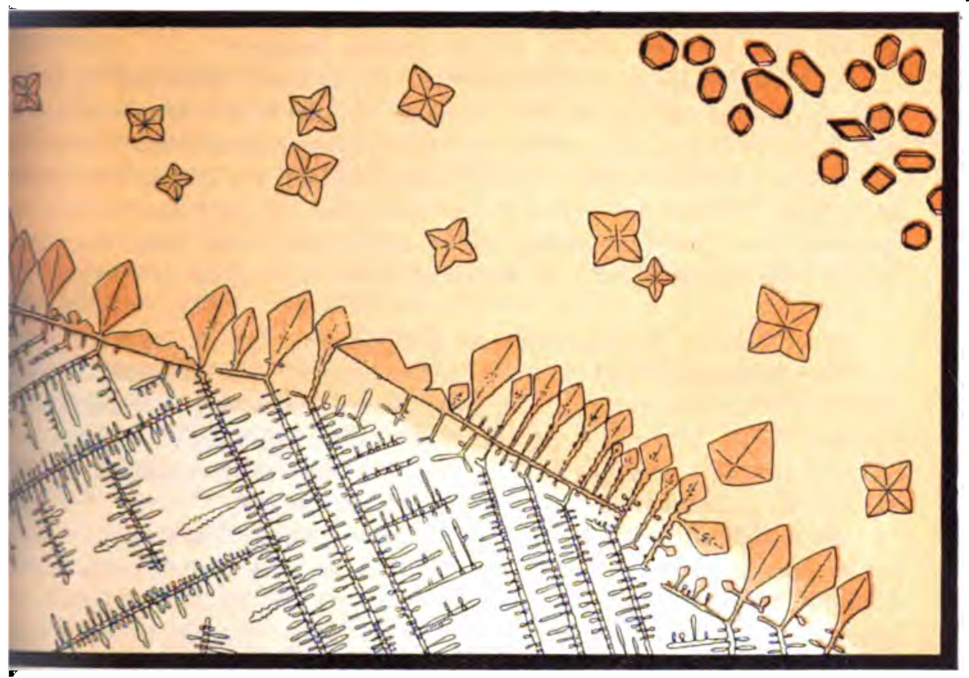
Ein anderes Beispiel ist das Zähwerden von geschmolzenem Schwefel bei starker Erhitzung und das Wiedereintreten der Leichtflüssigkeit beim Abkühlen.

Zu erwähnen wären ferner der Einfluß der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit, welcher als Ursache der Änderung des Gleichgewichts-

---

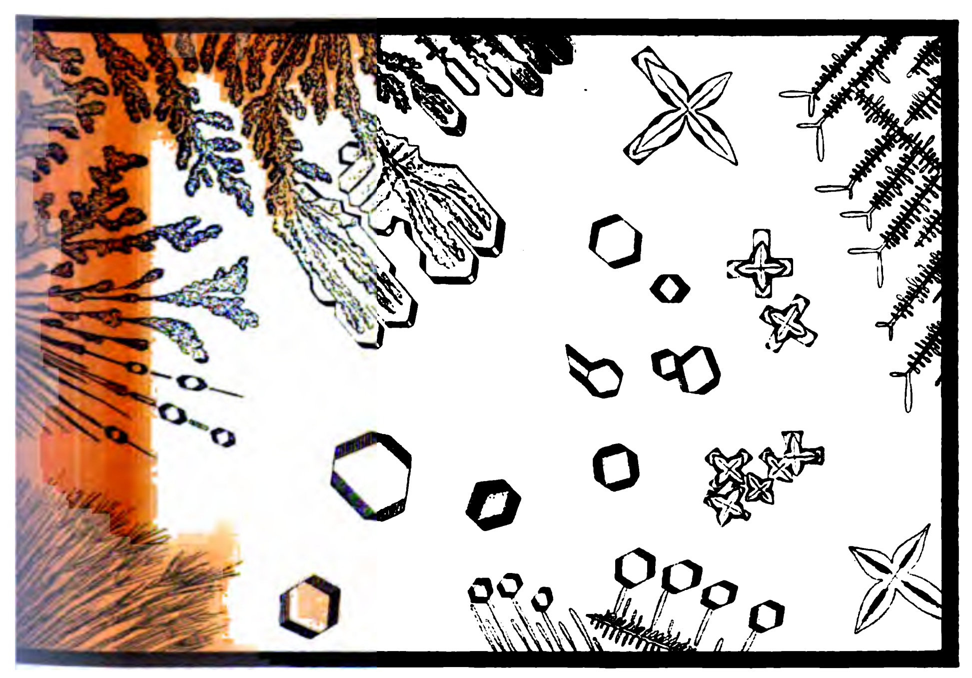
[1]) Über die Elastizität von Eis siehe Heß, Ann. d. Physik 8, 430, 1902. — [2]) Näheres hierüber in O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann. — [3]) Siehe O. Lehmann, Kristallanalyse, Leipzig 1891, W. Engelmann.

Fig. 3025.



Salmiak mit Eisenchlorid.

Fig. 3026.



Salmiak mit Kupferchlorid.

zustandes aufzufassen ist, der Einfluß gleichzeitiger Änderung des Drucks, z. B. die Umwandlung von Fischtran beim Erwärmen unter starkem Druck in Petroleum (Engler) und andere ähnliche chemische Vorgänge.

Scriba (Z. 15, 26, 1902) empfiehlt als Wärmeindikator die dunkelblaue Verbindung von Stärke und Jod, welche schon unter 100° ihre Farbe verliert, beim Abkühlen aber wieder gewinnt. Zur Herstellung werden einige Gramm sehr gut in kaltem Wasser geriebene Stärke durch Übergießen mit siedendem Wasser und nochmaliges Aufkochen in dünnen Kleister verwandelt und zu diesem einige Kubikcentimeter einer Jodlösung gebracht, welche man erhält, indem man einige Jodkristalle in Wasser bringt und sie mit etwas festem Kaliumjodid überschichtet.

413. Anomale Ausdehnungen bei Flüssigkeiten. Pisati (1876) fand, daß die Kurve, welche das spezifische Volumen des flüssigen Schwefels darstellt, zwischen 160 bis 170° ein Minimum hat. Die Anomalie tritt bei neu geschmolzenem Schwefel bedeutend stärker hervor, als bei solchem, der längere Zeit auf 300° erhitzt war. Nicol (1882) fand, daß der Ausdehnungskoeffizient von Glaubersalzlösung zwischen 34 und 36° kleiner wird, als bei niedrigeren Temperaturen.

Wird geschmolzener Phosphor längere Zeit unter Luftabschluß auf hoher Temperatur gehalten, so verwandelt er sich allmählich in festen roten Phosphor. Eine Spur Jod (Jodphosphor) beschleunigt (als Katalysator) die Umwandlung außerordentlich. Wird geschmolzenes amorphes Selen lange Zeit warm erhalten, so geht es in festes, graues, metallisch glänzendes Selen über. Pseudochlorkarbostyril geschmolzen und sofort abgekühlt erstarrt unverändert. Erhitzt man aber den Schmelzfluß weiter, so erstarrt er wieder, aber als isomere Verbindung (Einhorn 1887). Desgleichen Brenzcatechinkohlensäurehydrazid.

Alle diese Erscheinungen lassen sich leicht mittels des Projektionsmikroskops zeigen.

414. Anomale Löslichkeit. Glaubersalzlösung, bei gewöhnlicher Temperatur gesättigt, scheidet beim Erwärmen bis 33° Salz aus, von hier an steigt die Löslichkeit. Umgekehrt sinkt sie in nahezu normaler Weise bis 33°, nimmt aber dann wieder etwas zu, so daß sich ein Teil des ausgeschiedenen Salzes wieder auflöst. Zur Demonstration der Erscheinung dürfte sich ebenfalls am besten das Projektionsmikroskop eignen.

Saures äpfelsaures Calcium zeigt nach Iwig und Hecht (1886) bis 60° zunehmende, von da an abnehmende Löslichkeit, neutrales äpfelsaures Calcium verhält sich gerade umgekehrt.

Läßt man Salmiak aus heißer Lösung unter dem Projektionsmikroskop kristallisieren, so kann man leicht zeigen, wie bei sinkender Temperatur die Kristalle sich teilweise wieder auflösen. Die Änderung der Löslichkeit ist bedingt durch das Auftreten einer zweiten gleichfalls regulär kristallisierenden, polymorphen Modifikation.

415. Reversible Umwandlung unter Vermittelung eines Lösungsmittels. Ein geeignetes Demonstrationsobjekt ist z. B. ein Niederschlag von salpetersaurem Blei mit Jodkalium. Bei niedriger Temperatur erscheint derselbe in Form blaßgelber feiner Nadeln. Erwärmt man, so entstehen da und dort die gelben sechsseitigen Tafeln von Jodblei, welche allmählich die zuerst gebildeten Kristalle aufzehren. Beim

Abkühlen zehren umgekehrt die blassen Kristalle die intensiv gelben auf. Bei niedriger Temperatur haben also die ersteren, bei höherer die letzteren die größere Löslichkeit.

Die Lösung eines Gemenges von Kupferchlorid und Chlorammonium scheidet in der Wärme Kupferchloridkristalle ab, beim Abkühlen werden diese von Doppelsalzkristallen aufgezehrt (Fig. 3026, vgl. auch § 198, S. 870). Die Lösung darf nur wenig Chlorammonium enthalten. Beide Versuche werden mittels des Projektionsmikroskops demonstriert.

Eine Mischung von Stannochlorid- und Chromochloridlösung unter Luftabschluß auf 100° erhitzt, zerfällt in Lösung von Chromichlorid und Zinn, welches sich als Niederschlag aussondert. Beim Erkalten wird die Umsetzung wieder rückgängig.

416. Reversible Verflüssigung fester Körper. Erhitzt man wasserhaltiges kristallisiertes Eisenchlorür oder Kobaltchlorür unter Bedingungen, unter denen das Wasser nicht entweichen kann, so verwandeln sie sich plötzlich bei einer bestimmten Temperatur in einen Brei von wasserärmerem Salz und Lösung. Umgekehrt erstarrt dieser Brei wieder zur ursprünglichen wasserreicheren Masse, sobald man unter die betreffende Temperatur abkühlt. Sehr hübsch gestaltet sich der Versuch bei Anwendung des Projektionsmikroskops.

Man gibt einen Tropfen konzentrierter Eisenchlorür- (Kobaltchlorür-)lösung auf einen Objektträger, dampft ihn durch Erhitzen etwas ein und bedeckt dann mit einem flachen Uhrglase, die konkave Seite nach oben. Beim Erkalten bilden sich allmählich großblätterige Kristalle, je größer, um so besser. Sobald diese aufgehört haben zu wachsen, bringt man den Objektträger auf den Tisch des Mikroskops und erhitzt sehr rasch. Die kleineren Kristalle lösen sich auf, von den größeren sind aber nach Erreichen der nötigen Temperatur noch Fragmente übrig, und diese sieht man dann plötzlich in parallel stehende wasserärmere Kristalle zerfallen.

Die roten Kristalle von Magnesiumplatincyanür zerfallen beim Erhitzen in wasserärmeres gelbes Salz. Die Rückbildung des roten Salzes erfolgt sehr langsam.

Wird nach van' t Hoff und van Deventer eine Mischung von Magnesiumsulfat und Natriumchlorid über 31° erwärmt, so erfolgt Verflüssigung der Masse, d. h. chemische Umsetzung nach der Gleichung:

$$2SO_4Mg.7H_2O + 2ClNa = (SO_4)_2MgNa_2.4H_2O + MgCl_2.6H_2O + 4H_2O.$$

Kühlt man das entstandene Gemenge von Astrakanit und Chlormagnesium wieder unterhalb 31° ab, so wandelt sich dasselbe wieder in ein Gemisch von Magnesiumsulfat und Natriumchlorid um.

Wird das Doppelsalz Kupfercalciumacetat $CaCu(C_2H_3O_2)_4 + 8H_2O$ über 70° erhitzt, so nimmt die ursprünglich blaue Masse eine grüne Färbung an und wird feucht, indem sich die getrennten Acetate: Kupferacetat, $Cu(C_2H_3O_2)_2.H_2O$, und Calciumacetat, $Ca(C_2H_3O_2)_2.H_2O$, bilden. Bei Abkühlung wird der Prozeß wieder rückgängig.

Wird ein Gemenge des rechten und linken Natriumammoniumtartrats,

$$C_4H_4Na(NH_4)O_6.4H_2O + C_4H_4Na(NH_4)O_6.4H_2O,$$

über 28° erhitzt, so bildet sich unter Verflüssigung der Masse Natriumammoniumracemat, $C_8H_8Na_2(NH_4)_2O_{12}.2H_2O + 6H_2O$. Wird diese Flüssigkeit unterhalb 28° abgekühlt, so bilden sich hieraus wieder die beiden Doppeltartrate.

Wird ein Gemenge von Bittersalz und Glaubersalz in feingepulvertem Zustande bei Temperaturen unter 21½° sich selbst überlassen, so tritt keine Änderung ein, während oberhalb dieser Temperatur nach längerer oder kürzerer Zeit Astrakanitbildung unter Verflüssigung der Masse erfolgt nach der Gleichung:

$$SO_4Mg . 7H_2O + SO_4Na_2 . 10H_2O = (SO_4)_2MgNa_2 . 4H_2O + 13H_2O.$$

Bei Abkühlung unter 21° wird der Prozeß wieder rückgängig.

Alle diese Erscheinungen können durch Bestimmung der Wärmeausdehnung verfolgt werden, wenn man die Substanzen in ein Dilatometer bringt, welches im übrigen mit einer indifferenten Flüssigkeit gefüllt ist, wobei man natürlich durch Evakuieren alle Luftblasen sorgfältig entfernen muß. Zur Demonstration mittels des Projektionsmikroskops eignet sich besonders der Versuch mit Kupfercalciumacetat.

417. Doppelte Sättigungspunkte. Das Auskristallisieren von zwei Modifikationen (S. 879) aus derselben Lösung kann man mittels des Projektionsmikroskops demonstrieren, z. B. bei Salmiak mit wenig Cadmiumchlorid, Salmiak mit Brom- und Jodammonium, salpetersaurem Ammoniak (geschmolzen und nach dem Erstarren mit Wasser umgeben, dann nochmals erhitzt), Quecksilberorthoditolyl, Protocatechusäure mit wenig Phenol und Alkohol, Cholesterylbenzoat, Azoanisol u. s. w. Näheres hierüber siehe weiter unten § 418.

418. Physikalische Isomerie. Das älteste bekannte Beispiel dieser Erscheinung ist der Schwefel. Wird Schwefel in einem größeren (z. B. hessischen) Tiegel geschmolzen, alsdann abgekühlt, bis sich eine Kruste auf der Oberfläche gebildet hat, nun diese Kruste mit einem Stäbchen durchstochen und der noch flüssige Schwefel ausgegossen, so findet man die Wände des Tiegels mit durchsichtigen bräunlichgelben nadelförmigen Schwefelkristallen bedeckt. Dieselben lassen sich ohne Änderung bis zu gewöhnlicher Temperatur abkühlen. Bringt man sie nun aber mit Stücken von gewöhnlichem festem Schwefel in Berührung, so werden sie ebenfalls wie dieser undurchsichtig und erhalten die eigentliche hellgelbe Farbe des Schwefels. Bei längerem Liegen findet dieser Übergang auch ganz von selbst statt. Sehr schön läßt sich derselbe beobachten, wenn nicht einzelne Kriställchen genommen werden, sondern wenn man den Schwefel in eine flache eiserne Schale oder in Form dicker Stangen gießt, wie solche im Handel zu haben sind. Er ist zunächst fast durchsichtig und braungelb. Von einzelnen Stellen breitet sich aber bald eine scharf begrenzte Trübung aus, und die Farbe wird hier schwefelgelb.

Ein anderes längst bekanntes Beispiel ist das Quecksilberjodid. Dasselbe ist indes nicht in schön hellgelbem Zustande aus dem Schmelzfluß zu erhalten, und außerdem der giftigen Dämpfe halber als Demonstrationsobjekt wenig geeignet. Am einfachsten bestreicht man damit ein Stück Filtrierpapier, erwärmt, bis die Gelbfärbung eintritt und kühlt wieder ab. Drückt man nun irgend eine Stelle des Papiers etwa mit einem Glasstabe, so wird sie rot.

Weniger geeignet ist Quecksilberjodid in einem Reagenzglas geschmolzen, sehr schön dagegen zeigt die Umwandlung ein mikroskopisches Präparat, durch Schmelzen auf einem Objektträger und Aufpressen eines Deckglases hergestellt.

Saugt man geschmolzenes Jodsilber in eine heiß gemachte Kapillarröhre ein und läßt es erstarren, so bildet es zunächst eine durchscheinende rotgelbe Säule. Sobald aber die Temperatur bis zu einem gewissen Punkte gesunken ist, wird die

Farbe infolge des Überganges aus der regulären in die hexagonal-kristallisierende Modifikation plötzlich hell. Dabei zerspringt das Kapillarrohr nach allen Richtungen, da die hexagonale Modifikation größeres Volumen einnimmt wie die reguläre.

Eine mit dem roten Quecksilberkupferjodid bestrichene Kupferplatte wird beim Erhitzen über 70° dunkelbraun, beim Abkühlen wieder rot [1]. Papier mit dieser Verbindung bestrichen, oder besser mit Quecksilbersilberjodid, bildet das Farbenthermoskop von Heß, mittels dessen erkannt werden kann, ob die Temperatur eine bestimmte Grenze übersteigt.

Die Umwandlungsgeschwindigkeit ist bei verschiedenen Substanzen verschieden und kann unmerklich klein sein. Sie nimmt mit sinkender Temperatur zu, wird aber von einem Maximum an wieder geringer.

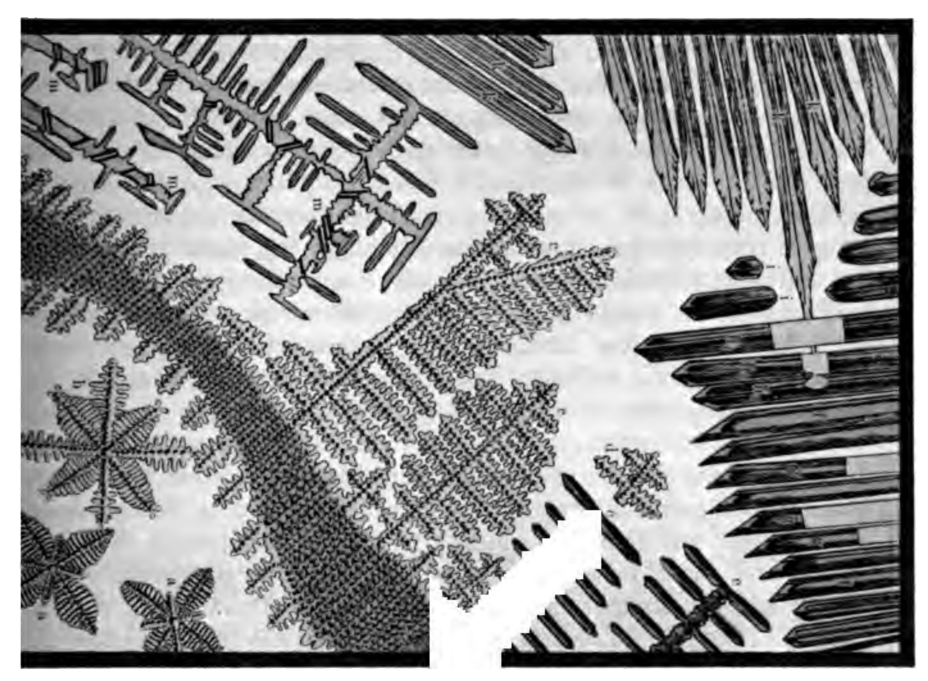
419. Das Farbenthermoskop [2]. Zur Herstellung des Silberquecksilberjodids gibt Rebenstorff folgendes Rezept: 15 g käufliches Quecksilberjodid werden mittels 11 g Jodkalium in etwa 100 g destilliertem Wasser gelöst. Die Lösung erfolgt viel schneller, wenn zunächst dem Gemenge der Jodide nur ganz wenig Wasser hinzugefügt wird. Alsdann wird die eventuell erkaltete Lösung von 11,25 g Silbernitrat in 50 bis 100 g Wasser langsam und unter beständigem Umrühren der obigen Lösung hinzugesetzt. Der anfangs etwas ins Rötliche spielende Niederschlag setzt sich um so schneller ab, je genauer das Ausfällen stattfand. Der nach mehrstündigem Stehenlassen rein gelbe Farbkörper wird am besten hauptsächlich durch Dekantieren ausgewaschen, dann auf ein Filter gebracht, zunächst im Trichter — um Zerreißen des Papiers beim Herausnehmen zu verhüten — teilweise, schließlich an der Luft oder bei ganz gelinder Wärme (30 bis 40°) völlig getrocknet. Solange der Niederschlag nicht ganz wasserfrei ist, halte man sehr helles Tageslicht von ihm fern. Trocknen bei höherer Temperatur, sowie unnütz langes Auswaschen schaden der Feinpulverigkeit des Farbkörpers und damit der Gleichmäßigkeit der später zu gewinnenden Anstriche. Zur Befestigung des Quecksilberjodids auf Papier dient Zaponlack [3]. Auch Gefäße, Lager für Transmissionswellen u. s. w. können mit solcher Thermoskopfarbe bestrichen werden, so daß der plötzliche Übergang der gelben Farbe in die rotgelbe ohne weiteres erkennen läßt, daß die Umwandlungstemperatur (etwa 50°) überschritten würde.

420. Umwandlung von Metallen. Nach Fr. C. G. Müller (Z. 5, 34, 1891) kann man die Umwandlung von Zink leicht bei den käuflichen 8 mm starken Stäbchen zeigen. Ein über den Amboßrand gelegtes kaltes Stäbchen bricht durch einen Hammerschlag kurz ab. Hält man es darauf kurze Zeit in eine Flamme, bis es beim Betupfen mit dem angefeuchteten Finger zischt, so läßt es sich scharf umbiegen, ja bis zur Berührung der Schenkel zusammenschlagen, ohne zu brechen. Erhitzt man so lange, bis das Metall zu tropfen beginnt, so zeigt es sich wieder ganz brüchig.

Ein 2 bis 3 m langer galvanisch zum Glühen erhitzter Eisendraht läßt die Umwandlung durch plötzliche Verkürzung bei bestimmter Temperatur (Rotglut) sehr deutlich erkennen; ebenso durch plötzliche Ausdehnung bei Abkühlung.

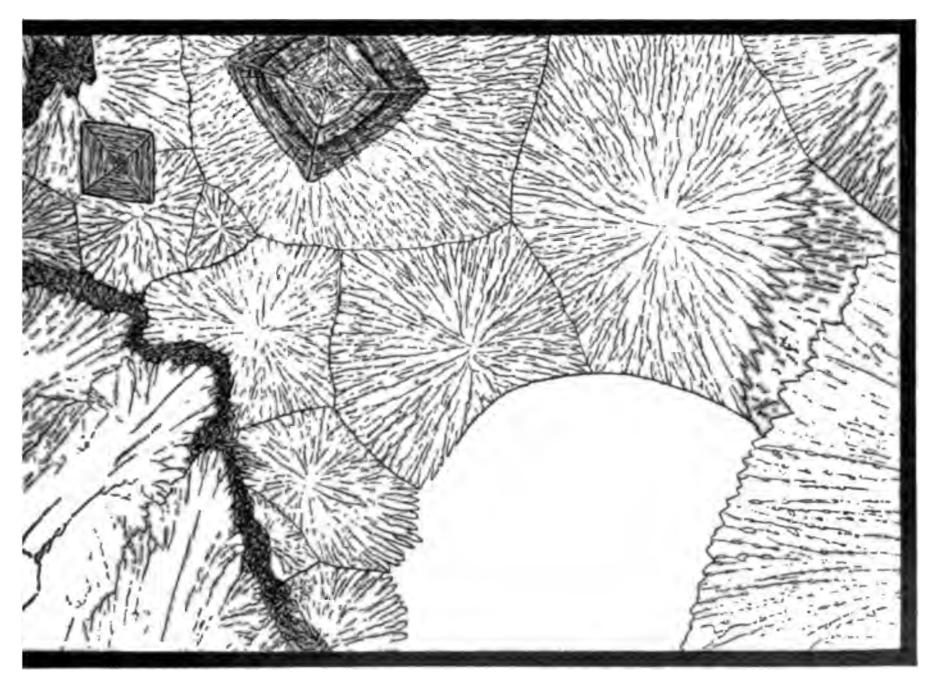
1) Vergl. O. Lehmann, Molekularphysik I, 165, 1888. — 2) Siehe Rebenstorff, Z. 9, 227, 1896, und 15, 145, 1902. — 3) Fertige Farbblätter sind von C. Lorenz in Chemnitz zu beziehen. Siehe auch Lussana, Beibl. 20, 871, 1890.

Fig. 3028.



Salpetersaures Ammoniak.

Fig. 3029.

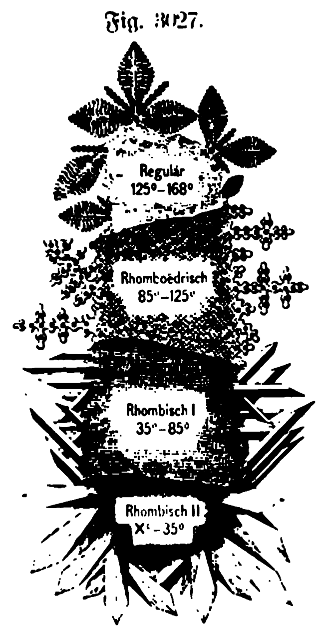


Quecksilberorthoditolyl.

Zuweilen tritt Überkühlung ein. Dieselbe wird durch Kohlenstoffgehalt befördert. Gehärteter Stahl ist stark überkühltes labiles Eisen. Durch Erwärmen (Anlassen) geht es in die stabile Modifikation über. Die Erscheinungen komplizieren sich aber dadurch, daß auch chemische Verbindungen mit dem Kohlenstoff in Betracht kommen.

421. Reversible Umwandlung (Enantiotropie). Das beste hierher gehörige Beispiel ist salpetersaures Ammoniak. Zur Demonstration dient das Projektionsmikroskop. Eine kleine Quantität der Substanz wird auf einem Objektträger geschmolzen und mit einem gewöhnlichen Deckglase bedeckt. Durch Verschieben und einseitiges Drücken entfernt man die Luftblasen und überläßt das Präparat längere Zeit sich selbst, jedenfalls so lange, bis es vollständig abgekühlt ist. Bringt man es dann unter das Mikroskop und erwärmt, so zieht sich alsbald eine scharf begrenzte Aufhellung über die Masse; erhitzt man weiter, so erscheint abermals eine derartige Umwandlung. War das Präparat hinreichend lange gekühlt und wurde die Erhitzung sehr vorsichtig bewirkt, so kann man selbst noch eine dritte Umwandlung beobachten, bis endlich bei weiterem Erhitzen die vierte Umwandlung erfolgt, der Übergang in die flüssige Modifikation. Beim Abkühlen erfolgen die Umwandlungen ebenso rückwärts.

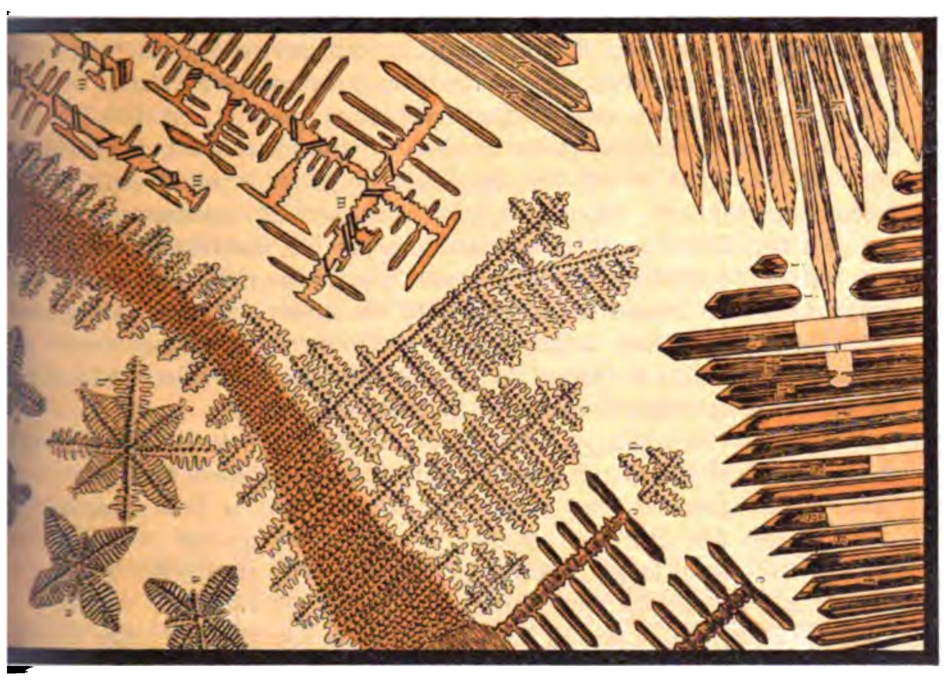
Fig. 3027.



Um die Veränderung der Kristallform zu demonstrieren, verfährt man in folgender Art. Es wird wieder eine kleine Quantität des Salzes auf einem Objektträger geschmolzen und mit einem flachen Uhrglase, die konvexe Seite nach unten, bedeckt. Nach der Abkühlung läßt man eine kleine Quantität Wasser unter das Uhrglas treten, so daß sie ringförmig das erstarrte salpetersaure Ammoniak umgibt. Nun bringt man eine Stelle der Grenzzone unter das Objektiv und erhitzt, bis sich ein Teil der festen Masse aufgelöst hat. Läßt man nun wieder abkühlen, so vergrößert sich die feste Masse wieder, es treten tannenbaumähnliche, sogenannte gestrickte Formen (Kristallskelette) auf, indes plötzlich verbreitet sich, mit scharfer Grenze fortschreitend, eine Trübung in der festen Masse, und sobald sie die freistehenden Kristallbäumchen erreicht, geraten diese lebhaft ins Schwanken und wachsen alsbald weit rascher, aber in total veränderter Form, als lange Spieße der rhombischen Modifikation des Salzes weiter (Fig. 3028); Fig. 3027 zeigt die vier Modifikationen schematisch. In Fig. 3028 ist *a* regulär; *b* regulär in rhomboedrisch umgewandelt, *c*, *d* rhomboedrisch; *e*, *m* rhomboedrisch in rhombisch I umgewandelt; *f*, *g*, *h*, *i* rhombisch I; *k* rhombisch II.

Am großen kristallisiert salpetersaures Ammoniak aus heißer, mit Alkohol versetzter wässeriger Lösung in langen durchsichtigen biegsamen Nadeln, die sich ziemlich lange auch bei gewöhnlicher Temperatur halten. Berührt man aber eine solche Nadel mit einem Stückchen des gewöhnlichen salpetersauren Ammoniaks, so entsteht alsbald an der betreffenden Stelle eine Trübung, die sich bald langsamer, bald rascher in der Nadel fortpflanzt, bis diese schließlich an allen Teilen undurchsichtig geworden ist.

Fig. 3028.



Salpetersaures Ammoniak.

Fig. 3029.

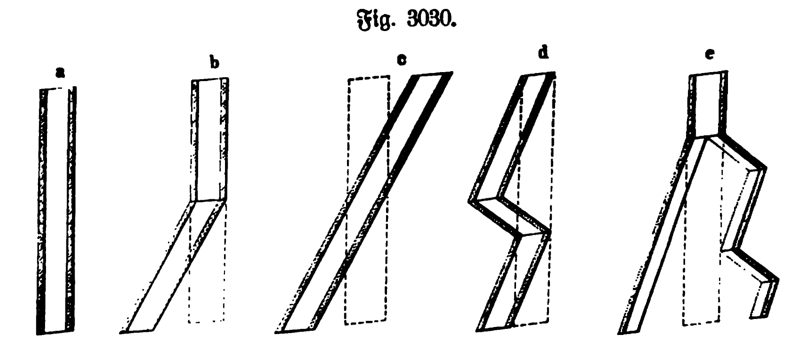


Quecksilberorthoditolyl.

422. **Irreversible Umwandlung (Monotropie).** Das schönste Demonstrationsobjekt bildet Orthoquecksilberditolyl. Ebenso wie im vorigen Falle wird eine kleine Quantität auf einem Objektträger geschmolzen, mit gewöhnlichem Deckglas bedeckt und ziemlich stark erhitzt, indes unter Vermeidung von Blasenbildung. Nunmehr legt man das Präparat, das Deckglas nach unten gewandt, auf Quecksilber und läßt es darauf schwimmen oder taucht es auch ganz unter, bis es sich vollständig abgekühlt hat. Wird es nun auf den Schirm projiziert, so erblickt man das Gesichtsfeld, erfüllt von radial gruppierten oder parallel angeordneten, dicht gedrängten Kristallnadeln. Erwärmt man, so zeigen sich, namentlich am Rande, da und dort dunkle Flecken, von welchen aus eine Trübung langsam in der Masse fortschreitet. Sie bewegt sich indes rascher und rascher, je mehr man erwärmt, und schließlich ist es keine Trübung mehr, sondern eine Druse von deutlich umgrenzten tafelförmigen Kristallen der stabilen Modifikation. Beim Abkühlen wird die Umwandlung nicht rückgängig. (Fig. 3029, S. 1139).

Phtalsäureanhydrid. Löst man eine kleine Menge der Substanz unter Kochen in relativ viel Terpentinöl auf dem Objektträger eines Mikroskops, wobei man die Flüssigkeit mit einem flachen Uhrglase, die konkave Seite nach oben gerichtet, bedeckt und läßt nun erkalten, so scheiden sich zunächst kleine sechsseitige Tafeln aus, dann lange nadelförmige Kristalle, die gewöhnliche Modifikation. Kommt nun ein Kristall der letzteren, der stabilen Modifikation, mit einem der labilen in Berührung, so wandelt sich dieser sofort um und zwar mit solcher Schnelligkeit, daß das Auge dem Vorgange kaum folgen kann. Manchmal sieht man auch einen labilen, völlig isoliert liegenden Kristall sich ganz von selbst umwandeln.

Fig. 3030.



Protokatechusäure. Man bringt einige Körnchen derselben, sowie etwas kristallisiertes Phenol und einen Tropfen Wasser auf den Objektträger des Mikroskops, bedeckt mit einem flachen Uhrglase, die konkave Seite nach oben gekehrt, und erhitzt, bis die Masse sich völlig verflüssigt hat. Nun bringt man den Objektträger auf den Objekttisch, stellt den Tubus ein und läßt abkühlen. War die Mischung richtig (namentlich nicht zu wenig Protokatechusäure und zu viel Phenol) und die Temperatur der Lösung hinreichend hoch, so sieht man nun bald vereinzelte asymmetrische, in einer bestimmten Stellung fast gerade erscheinende Prismen auftreten (Fig. 3030 *a*), welche aber nicht beständig sind, sondern alsbald eigentümliche, mit Formänderungen verbundene Strukturänderungen erleiden. Man sieht nämlich plötzlich an den Enden oder auch an beliebigen Stellen in der Mitte eines solchen Prismas Verschiebungen auftreten (Fig. *b*), derart, daß die Schiefe des neu entstandenen Prismas (Fig. *c*) etwa 55° beträgt. Selten gelingt der Versuch in dieser

einfachen Weise. Gewöhnlich ändert sich nach einiger Zeit die Richtung der Verschiebung in die entgegengesetzte (Fig. *d*), ja es kann selbst eine häufige Wiederholung dieses Wechsels eintreten bis zu solchem Grade, daß sich das Endprodukt von dem früheren scheinbar kaum anders als durch eine feine Streifung der Oberfläche unterscheidet. Zuweilen spaltet sich der Kristall und die eine Hälfte verschiebt sich nach rechts, die andere nach links (Fig. *e*). Die Verschiebung erfolgt so rasch und leicht, daß man glauben könnte, eine flüssige Masse vor sich zu haben, durch welche sich momentan eine Erschütterung fortpflanzt. Die Kraft genügt, um die Kristalle, falls sie teilweise frei sind, in Bewegung zu setzen und kleine Hindernisse zu beseitigen. Bei reinen wässerigen Lösungen ist die Erscheinung ebenfalls, doch schwieriger, zu beobachten, da die Kristalle kleinere Dimensionen annehmen. Man sieht dann auch häufig zunächst einen schiefen Kristall der stabilen Modifikation anschießen, an welchen an einer Ecke ein Fortsatz des labilen anwächst. Nach kurzer Zeit klappt letzterer um und schiebt sich so, daß seine Kanten denen des schiefen Prismas parallel werden.

Mittels des Projektionsmikroskops lassen sich alle diese Erscheinungen leicht objektiv machen.

423. Fließende Kristalle. In manchen Fällen tritt eine enantiotrope Umwandlung in eine fließend- oder flüssig-kristallinische Modifikation ein, d. h. bei Überschreitung der Umwandlungstemperatur wird die Masse plötzlich scheinbar oder wirklich flüssig, behält aber eine regelmäßige Struktur, obschon die Verschiebungselastizität nahezu bezw. vollkommen verschwindet. Beispiele für den letzteren Fall bilden die bereits in § 398 besprochenen Stoffe, Beispiele für Umwandlung in fließende Kristalle sind namentlich Cholesterylbenzoat[1]) und Paraazoxybenzoesäureäthylester[1]). Besonders das letztere Präparat mit einer Spur von Kolophonium versetzt und längere Zeit auf Schmelztemperatur erhitzt, eignet sich ausgezeichnet für Demonstration mittels des Projektionsmikroskops. Fig. 3033 *a* und *b* zeigen derartige Präparate. Die Kristalle sind gerundete Prismen mit Anschwellungen, die durch das Zusammenfließen mehrerer Individuen bedingt sind. Sobald zwei derartige Kristalle in Berührung kommen, fließen sie sofort zusammen wie zwei Öltropfen in Wasser.

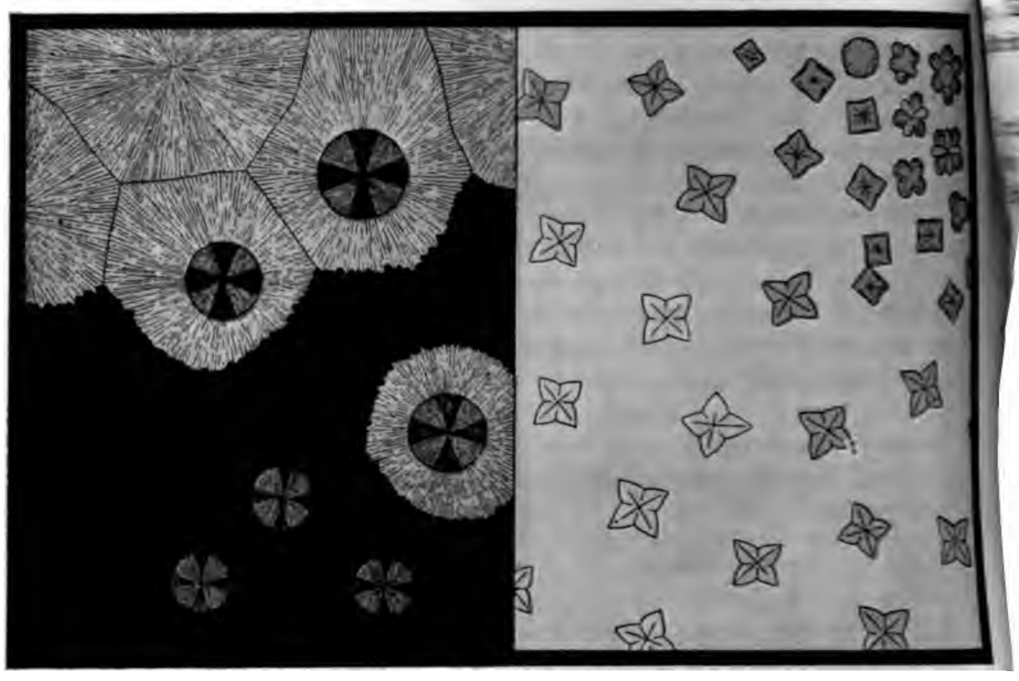
Fig. 3031.

Um die Volumenänderungen bei der Umwandlung zu demonstrieren, z. B. beim Übergang der rhombischen Schwefelmodifikation in die monokline und umgekehrt, dient nach van 't Hoff und Reicher am einfachsten das Dilatometer[2]). Ein leicht selbst herzustellendes Instrument dieser Art zeigt Fig. 3031 (K, 7,50).

424. Änderung der Umwandlungstemperatur durch Druck. Mittels des Dilatometers läßt sich dieselbe ebenfalls nachweisen. Von besonderem Interesse ist die zwischen 36 und 65° beständige Modifikation des salpetersauren Ammoniaks, da für diese die untere Umwandlungstemperatur steigt, die obere abnimmt, so daß sie

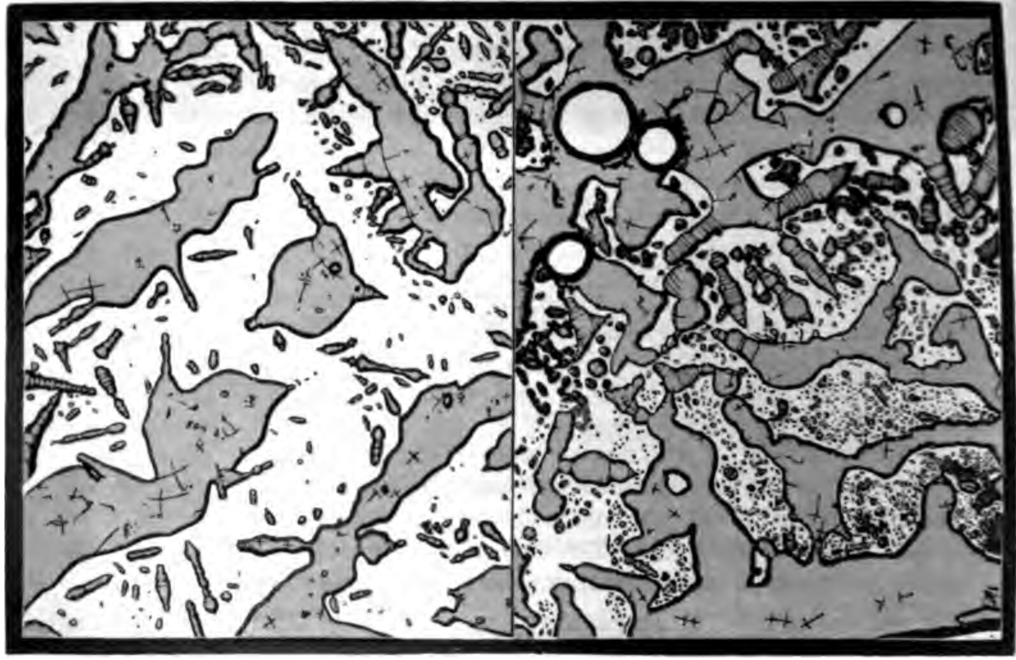
[1]) Siehe O. Lehmann, Flüssige Kristalle, Leipzig 1904, W. Engelmann, S. 24 u. ff. — [2]) Hier könnte ferner noch die Umwandlung von Mischkristallen und die thermische Nachwirkung besprochen werden.

Fig. 3032 b. Fig. 3032 a.



Triphenylguanidin. Salmiak mit Kobaltchlorür.

Fig. 3033 a. Fig. 3033 b.



Azoxybenzoesäureäthylester.

schließlich überhaupt nicht mehr existieren kann, wie Tammann nachgewiesen hat [1]). Zur Demonstration könnte vermutlich das gleiche Verfahren wie im Falle der Löslichkeitsänderung durch Druck benutzt werden.

425. Schmelzen und Erstarren. Das geeignetste Demonstrationsobjekt dürfte Orthoquecksilberditolyl sein. Man projiziert mittels des Projektionsmikroskops die labil erstarrte Schmelze auf einen Schirm, erhitzt rasch bis zum Schmelzen und läßt wieder abkühlen. (Vergl. S. 1140.)

Zur Demonstration der Kristallbildung im großen, die man namentlich bei Metallen nicht vermutet, eignet sich Wismut.

Man erreicht diese Kristallisation am leichtesten, wenn man etwa 2 bis 4 kg des Metalls in einem eisernen, fast halbkugelförmigen Gießlöffel schmilzt und den Löffel nur sehr langsam erkalten läßt, bis sich eine feste Haut auf dem Metalle gebildet hat, die man dann mit einem Eisendrahte einstößt, wonach man rasch das innere noch flüssige Metall ausgießt. Man erhält nicht immer größere Kristalle, wohl aber stets eine Oberfläche, aus welcher zahllose Würfelecken mehr oder weniger weit hervorstehen. Schöne große Kristalle aber, mit den schönsten Treppenbildungen, kann man nur erhalten, wenn man das käufliche Wismut vorher chemisch reinigt, was jedoch eine ziemlich umständliche Operation ist. Wenn man recht weiches Blei auf ähnliche Weise behandelt, so zeigt es ebenfalls Kristallecken. Beim Erstarren eines Schmelzflusses zeigen sich auch dieselben Anomalien der Kristallbildung wie bei Kristallisation aus Lösungen, welche zur Entstehung reich verzweigter und verästelter, noch vielfach verbogener und verdrehter Gebilde führen, die oft große Ähnlichkeit mit organischen Formen haben. Hierdurch ist z. B. das eigenartige blumenkohlartige Aussehen gefrorener Fensterscheiben bedingt.

Auch fremdartige (isomorphe) Kristalle können in Schmelzflüssen wie in Lösungen weiterwachsen, so daß sie nach beendeter Erstarrung vollkommen fest mit dem Erstarrungsprodukte verbunden erscheinen.

Gießen, Löten und ähnliche auf dem Schmelzprozeß beruhende Arbeiten wurden bereits auf S. 464 u. ff. besprochen [2]).

Fig. 3034.

426. Volumenänderung beim Erstarren. Daß sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt, kann man leicht sehen, wenn man es in einer vollständig gefüllten und verstöpselten Flasche gefrieren läßt. Letztere wird dabei zersprengt.

Leybolds Nachf. in Köln liefern kleine eiserne Bomben zum Zersprengen mit gefrierendem Wasser. Man legt sie nach der Füllung in eine Kältemischung, nachdem man an den Stöpsel eine Schnur gebunden hat, um sie leicht wieder herausziehen zu können (Fig. 3034 Lb, 1,80).

Wais (Z. **13**, 219, 1900) zeigt das Zersprengen an einem mit Wasser gefüllten und an beiden Enden zugeschmolzenen Glasröhrchen, welches in Äther hineingelegt wird, den man zuvor durch Durchleiten von Leuchtgas, wobei das ausströmende Äthergasgemenge an der Ausströmungsspitze angezündet wird, genügend abgekühlt hat (Fig. 3035 K, 8,50).

[1]) G. Tammann, Kristallisieren und Schmelzen, Leipzig 1903, Barth, S. 290. —
[2]) Gießformen als Spielzeug liefert die Leipziger Lehrmittelanstalt (Dr. O. Schneider), Leipzig, Windmühlenstr. 39.

Loofer (Z. 15, 266, 1902) benutzt einen dem Bunsenschen Eiskalorimeter nachgebildeten Apparat. In das Reagenzglas wird Äther eingefüllt und durch durchgeleitetes Leuchtgas abgekühlt. Das Steigrohr wird mit einem Thermoskopmanometer verbunden. Sobald sich die ersten Eisnadeln bilden, sieht man die Manometerflüssigkeit steigen.

Wismut hat ebenfalls die Eigenschaft, beim Festwerden ein größeres Volumen anzunehmen. Man kann dieses zeigen, wenn man geschmolzenes Wismut in eine Glasröhre auffaugt oder eingießt. Die Röhre springt beim Erstarren des Wismuts in allen Richtungen. Einige Legierungen des Wismuts haben die gleiche Eigenschaft.

427. Schmelzpunktsbestimmung. Dazu dienliche kleine Apparate zeigen die Fig. 3036 (K, 20) und 3037 (Hu, 27,5). Leicht schmelzbare organische Stoffe schließt man in ein Kapillarröhrchen ein, welches an das Thermometergefäß angebunden und mit diesem in ein heizbares Flüssigkeitsbad eingesenkt wird.

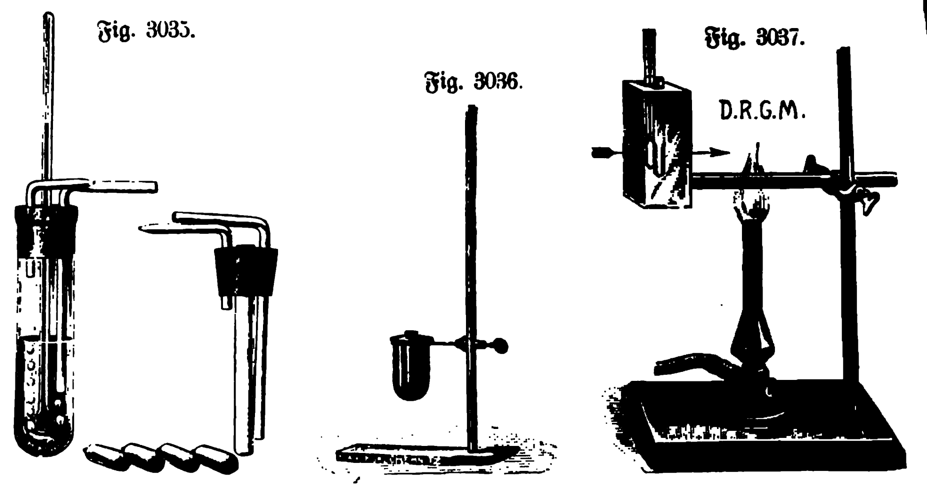


Fig. 3035. Fig. 3036. Fig. 3037.

Zur genauen Bestimmung des Schmelz- oder Erstarrungspunktes ist es notwendig, feste und flüssige Modifikation miteinander in Berührung zu erhalten, z. B. indem man in den Schmelzfluß Kristalle der festen Modifikation einbringt und die Temperatur so reguliert, bis sich diese weder auflösen noch auch weiterwachsen.

Die Schmelzpunkte der bekanntesten Metalle sind: Cadmium 322°, Blei 327°, Zink 419°, Antimon 631°, Aluminium 657°, Messing 900°, Silber 962°, Gold 1064°, Kupfer 1084°, Gußeisen 1200°, Eisen und Stahl 1400°, Nickel 1484°, Palladium 1584°, Platin 1780°.

Einige andere Schmelzpunkte sind folgende: Schwefel 114°, Wachs 64°, Eis 0°, Cyan —34°, Quecksilber —39°, Chloroform —71°, Schwefeldioxyd —76°, Ammoniak —79°, Schwefelwasserstoff —85°, Toluol —102°, Chlor —102°, Methylformiat —108°, Schwefelkohlenstoff —113°, Stickoxydul —115°, Chlorwasserstoff —116°, Äthyläther —118°, Arsenwasserstoff —119°, Bromäthyl —126°, Äthylalkohol —130°, Phosphorwasserstoff —133°, Stickoxyd —167°, Äthylen —169°, Methan —185°, Argon —190°, Kohlenmonoxyd —207°, Stickstoff —214°.

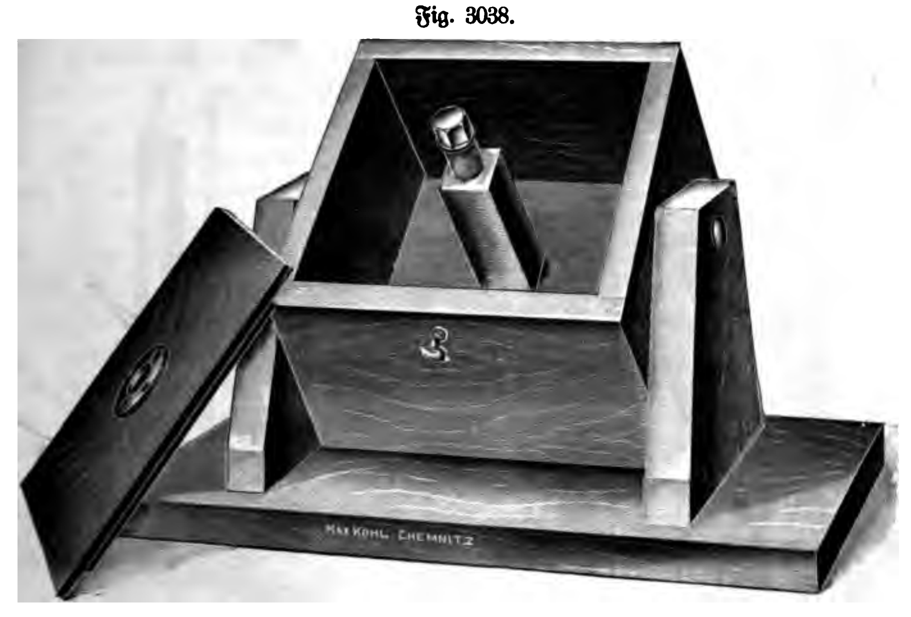
Der Erstarrungspunkt von Wasserstoff liegt bei —257°. Auch Helium, dessen Siedepunkt wenig von dem des Wasserstoffs verschieden ist, kann durch Abkühlung in festem Wasserstoff zum Erstarren gebracht werden.

428. Zusammenhang von Löslichkeit und Schmelzpunkt. Von verschiedenen in einer Flüssigkeit löslichen Stoffen sind im allgemeinen die leichter schmelzbaren auch leichter löslich. Bei Ammoniumnitrat kann man geradezu alle Übergänge von der wässerigen Lösung bis zum reinem Schmelzfluß herstellen.

429. Änderung von Sättigungs- und Schmelzpunkt durch Druck. Auf die Änderung der Löslichkeit durch Druck wurde bereits S. 890 hingewiesen. Gleiches gilt natürlich für die Sättigungstemperatur, sowie den Schmelzpunkt.

Der S. 754 erwähnte Moussonsche Apparat, welcher ermöglicht nachzuweisen, daß das Eis unter starkem Drucke schmilzt[1]), kann auch dazu dienen, nachzuweisen, daß dasselbe bei genügend starker Kälte auch unter Druck erstarren kann. Einfacher

Fig. 3038.



zeigt man aber den Einfluß des Druckes bei höher schmelzenden organischen Substanzen, welche man in ein mit einer Druckpumpe in Verbindung stehendes Kapillarrohr einschließt, welches mittels des Projektionsmikroskops objektiv dargestellt wird.

430. Doppelte Schmelzpunkte. Mehrfache Schmelzpunkte werden bei Körpern mit mehreren monotropen Modifikationen beobachtet, z. B. Quecksilberorthoditolyl. Erhitzt man die labile Modifikation unter dem Projektionsmikroskop über den Schmelzpunkt und läßt abkühlen, so wachsen die noch vorhandenen Reste der labilen Masse in dünnen Nadeln weiter, genau wie aus einer Lösung, nur dichter aneinander gedrängt, weil eben kein Lösungsmittel übrig bleibt, das die Fugen ausfüllen würde. Erzeugt man nun die stabile Modifikation und erhitzt wieder bis zum Schmelzen, so kann man sehr schön sehen, wie die labile Modifikation bereits bei niedrigerer Temperatur in die flüssige übergeht, als die stabile (oder wie man gewöhnlich sich ausdrückt, einen niedrigeren Schmelzpunkt hat als diese), ja man sieht die stabile noch rasch weiter wachsen, während die labile in lebhaftem Schmelzen begriffen ist (Fig. 3029).

[1]) Fig. 3038 K, 40 zeigt den Apparat in einem Kasten zur Aufnahme der Kältemischung.

431. Maximum der Dichtigkeit des Wassers. Um diese Tatsache zu zeigen, nimmt man eine starke Thermometerröhre von etwa 1 mm innerer Weite und bläst an dieselbe eine Kugel von etwa 4 cm Durchmesser. Dieses Thermometer wird nun mit destilliertem Wasser gefüllt und luftleer zugeschmolzen. Blasen, die sich etwa noch zeigen, bringt man durch Schwingen leicht in den leeren Teil der Röhre. Man bindet nun zwei gewichste Seidenfäden um die Röhre, setzt sie in schmelzendes Eis und schiebt den unteren Faden dem sinkenden Wasser nach, bis dieses wieder zu steigen beginnt; steigt es nicht mehr, so schiebt man nun auch den zweiten Faden an den Gipfel der Säule. Man kann nun die Kugel aus dem Eise in die Hand nehmen, um immer mehreren Personen zugleich zu zeigen, wie die Wassersäule anfänglich schnell, dann langsamer bis zum unteren Faden sinkt und dann wieder steigt. Hat das Wasser im Steigen den oberen Faden überschritten, so kann man

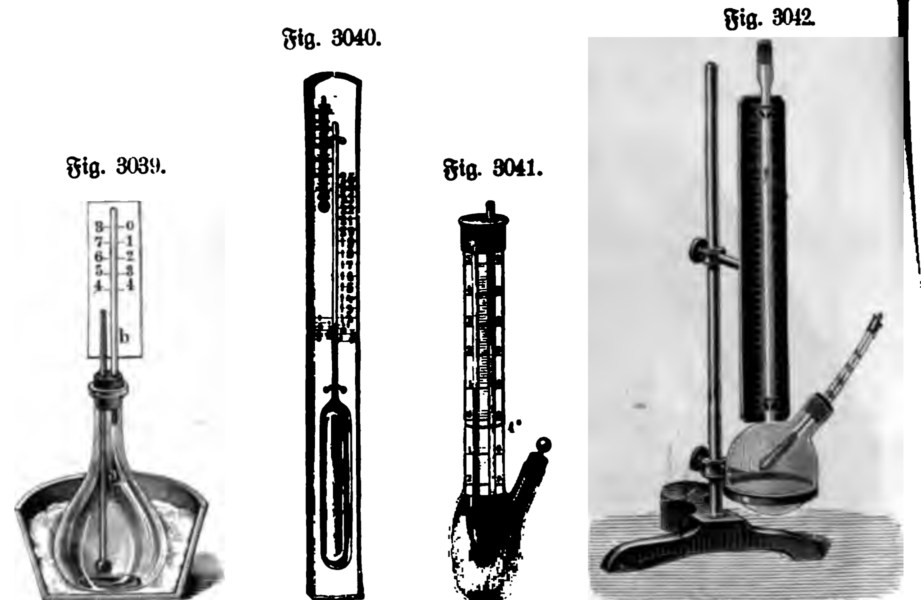


Fig. 3039. Fig. 3040. Fig. 3041. Fig. 3042.

die Kugel wieder in das Eis setzen, um so nach und nach die so wichtige Erscheinung ohne großen Zeitverlust mehreren Zuhörern zu zeigen; daß hierbei die Ausdehnung des Glases nicht berücksichtigt ist, schadet für den Zweck, den man beabsichtigt, nichts. Wollte man größere Apparate hierzu anwenden, um auch dickere, also sichtbarere Wassersäulen zu erhalten, so würde das Erkalten und Erwärmen viel zu langsam von statten gehen. Werden die angegebenen Dimensionen ungefähr eingehalten, so erhält man für die beiden Fäden immerhin einen Abstand von ungefähr 4 bis 5 mm. Messungen über die Temperatur des Maximums können ohnehin hier keine beabsichtigt werden. Übrigens kann man leicht eine kleine Glasflasche zu diesem Versuche herrichten, wenn man sie mit einem doppelt durchbohrten Kork versieht und ein geeignetes Thermometer *a*, Fig. 3039, in die eine Öffnung und eine etwa 1 bis 2 mm weite Glasröhre *b* in die andere steckt und letztere mit einer willkürlichen Skala versieht. Man bringt dann die Flasche in eiskaltes Wasser und erwärmt dasselbe langsam.

Ohne Flasche und Thermometer eignet sich der Versuch auch sehr gut zur Projektion.

Verschiedene Formen von Wasserdilatometern zu gleichem Zwecke zeigen die Fig. 3040 (Lb, 4,50); 3041 (S, 7,5); 3042 (E, 25).

Man kann auch so verfahren, daß man ein etwa 2 bis 3 dm hohes Glas zalb mit Wasser füllt, und ein Thermometer so befestigt, daß dessen Gefäß nahe m den Boden reicht. Schüttet man dann kleingestoßenes Eis oben in das Glas, o wird das Wasser allmählich abgekühlt, seine Temperatur sinkt aber nur bis - 4° C.

Steinhauser hat den aus dunkelfarbigem Glase verfertigten Schwimmer Fig. 3043) konstruiert, welcher so justiert ist, daß er bei + 4° C. so viel wiegt, vie ein gleiches Volumen Wasser von gleicher Temperatur. In inem mit Wasser von 0° gefüllten, etwa 3 cm weiten Glascylinder inkt er unter, sobald er gleichfalls auf 0° erkaltet ist; bringt man iber diesen Glascylinder in ein geheiztes Zimmer, so wird der Schwimmer nach einiger Zeit bis zum Wasserspiegel in die Höhe reigen, wenn die Temperatur des Wassers auf 4° C. gestiegen ist, nd dann bei fortdauernder Erwärmung des Wassers wieder sinken, venn dessen Temperatur ungefähr 8° erreicht hat.

Fig. 3043.

½

Recht einfach ist das „Maximumdichtigkeitsrohr“ von A. W. Hofmann. Eine 15 cm lange, 2 cm weite, unten geschlossene Glasröhre wird mit destilliertem Wasser gefüllt und außerdem ein Schwimmer aus farbigem Glase hineingebracht, velcher bei + 4° durch Einbringen von Quecksilber so justiert wird, daß er gerade den untertaucht, ohne aber zu Boden zu sinken. Hierauf wird auch das obere Ende der Glasröhre zugeschmolzen und sie ist nun für alle Zeiten präpariert. Beim Gebrauche stellt man sie in einen Cylinder mit Eiswasser, der Schwimmer sinkt ann, weil das Wasser leichter wird als bei 4°, zu Boden. Leitet man nun von nten her in den Cylinder langsam Wasser von gewöhnlicher Temperatur ein, so teigt er in die Höhe und schwimmt wieder, wenn + 4° erreicht ist. Setzt man un aber das Zuleiten von wärmerem Wasser fort, so sinkt er als-ald wieder herunter. Der Versuch eignet sich auch für Projektion.

Fig. 3044.

Looser (Z. 8, 293, 1895) füllt einen Standcylinder mit Eis-wasser und taucht zwei Thermoskope ein (siehe Doppelthermoskop S. 1054), das eine oben, das andere unten (Fig. 3044). Bald zeigt as untere eine höhere Temperatur an; es schwimmt also kälteres Wasser auf wärmerem. Nach einiger Zeit kehrt sich das Verhältnis m. Die Thermoskopkugeln werden mit Schrot beschwert, die oberen urch eine Drahtschlinge befestigt.

Früher wurden häufig Standcylinder mit seitlichen Ansatzröhren, in welchen ewöhnliche Thermometer horizontal befestigt waren, zu gleichem Zwecke benutzt [1]).

Zur bequemen Abkühlung empfiehlt Wais (Z. 13, 219, 1900), das Gefäß nit Äther zu umgeben und Leuchtgas durch diesen zu leiten; das Äthergasgemenge wird an der Ausströmungsröhre angezündet.

Merkelbach (Z. 14, 283, 1901) schichtet mittels eines Stechhebers von weiter, nit Tüll von 2 mm Maschenweite überbundener Öffnung, gefärbtes Wasser von 0° uf Wasser von 4°. Man bekommt eine scharfe haltbare Grenze, während bei um-gekehrter Schichtung sofort Mischung eintritt.

[1]) Neuerdings empfiehlt auch Looser (Z. 15, 259, 1902) Standcylinder mit seitlich eingesetzten Thermoskopkugeln.

reicht ist. (Erweichen von Harz, Glas, Guttapercha u. s. w.) Sowohl dieses Verhalten, wie auch die anomale Ausdehnung in der Nähe des Erweichungspunktes amorpher Körper weist darauf hin, daß sie Gemische mehrerer Modifikationen sind, deren Mengenverhältnis sich mit der Temperatur ändert.

Wird nach Orme (1740) und Le Conte (1880) eine Glasröhre von 50 bis 60 cm Länge und 2 cm Weite in der Nähe eines Feuers mit den Enden auf glatte Holzstücke aufgelegt, so rollt sie vom Feuer fort. Unterstützt man sie dagegen in der Mitte, so rollt sie zum Feuer hin. Die Erscheinung erklärt sich durch die Krümmung der Röhre infolge der einseitigen Ausdehnung.

Ein anderer einfacher Versuch, auf welchen Handl (1885) aufmerksam macht, ist folgender. Eine dünne Glasröhre oder ein Glasfaden von mindestens ½ m Länge wird am einen Ende befestigt und hinter dem freien Ende eine Skala befestigt. Nähert man nun wenig über der Befestigungsstelle von der Seite eine Flamme, so sieht man den Glasstab sich durchbiegen, insbesondere dann, wenn die Temperatur dem Erweichungspunkte des Glases sehr nahe kommt. Ganz bis zu diesem Punkte darf natürlich der Versuch nicht fortgesetzt werden, da alsdann nach Entfernung der Flamme der Glasstab nicht mehr in die gestreckte Form zurückkehren würde.

Glasblasen, Glaslöten und ähnliche auf Erweichung des Glases beruhenden Arbeiten wurden bereits auf S. 483 u. ff. beschrieben.

Auch die thermischen Nachwirkungen bei Thermometern, sowie deren Verminderung durch langdauerndes Erhitzen (künstliches Altern) können hier besprochen werden. Die dauernden Nachwirkungsdilatationen bestehen in einer langsamen Zusammenziehung des Thermometergefäßes, die vorübergehenden darin, daß nach Erwärmung das Gefäß erst nach einiger Zeit wieder sein anfängliches Volumen annimmt. Beträchtliche Nachwirkung (Depression des Nullpunkts) zeigen Gläser, die Kali und Natron in gleicher Menge enthalten, geringe solche, die nur Kali oder nur Natron enthalten (Jenenser Gläser).

436. Erstarrungsgeschwindigkeit und Entglasung. Beim Erstarren eines überkühlten Schmelzflusses wächst die Erstarrungsgeschwindigkeit mit der Überkühlung bis zu einem Maximum und nimmt dann wieder ab, um schließlich gleich Null zu werden. Amorphe Körper können als ungesättigte Lösungen mehrerer Modifikationen in der Schmelze betrachtet werden. Häufig kann man ihre Entglasung (Kristallisation) durch Erwärmen herbeiführen, wobei die Kristallisationsgeschwindigkeit anfänglich bis zu einem Maximum zunimmt und dann bis zum wahren Schmelzpunkt, bei welchem sie Null wird, sich vermindert. Gewöhnlich bilden sich dabei dichtfaserige Sphärokristalle.

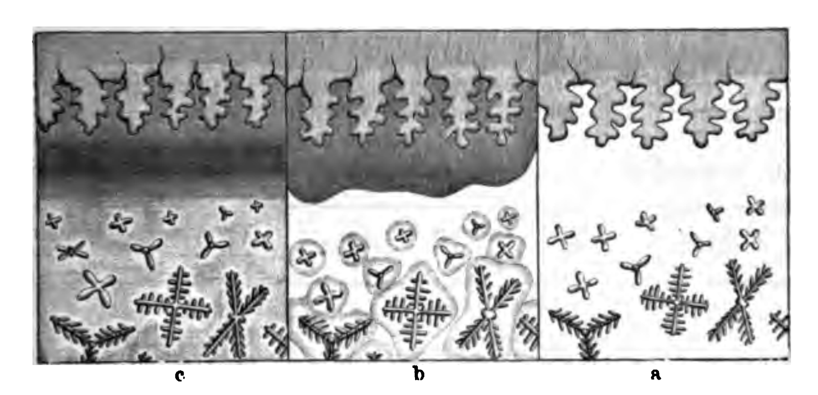
Die Entglasung läßt sich z. B. bei Benzoin (mit geringem Kolophoniumzusatz [1]) oder Triphenylguanidin (Fig. 3032 b, die Erscheinung zwischen gekreuzten Nicols darstellend) mittels des Mikroskops, bei amorphem Schwefel direkt zeigen. Schwefelglobuliten (s. o. S.) sind Tröpfchen von flüssigem überkühltem Schwefel, Reaumursches Porzellan [2]) ist durch langdauernde Erhitzung entglastes Glas. Vor der völligen Entglasung erscheint die klare Masse mit weißen Kugeln erfüllt.

---

[1]) Vergl. O. Lehmann, Flüssige Kristalle, S. 200 und Taf. 39, Fig. 20. — [2]) Vergl. auch O. Lehmann, Molekularphysik 1, 703 u. ff. u. a. O.

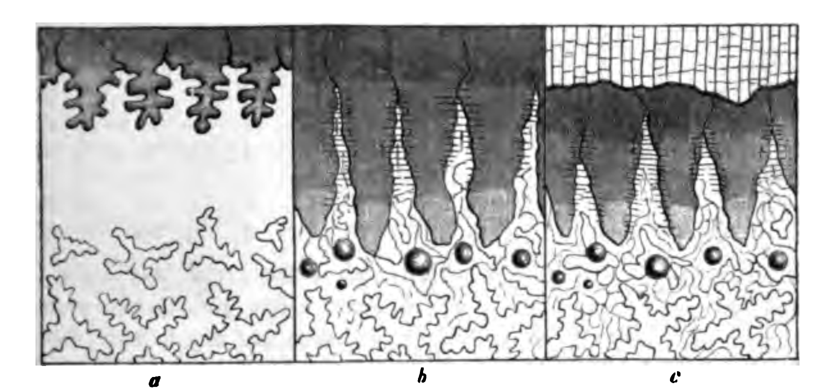
437. Erniedrigung des Sättigungspunktes beim Kontakt zweier Lösungen. Am besten dürften hierzu heiß gesättigte Lösungen von Salpeter und salpetersaurem Blei zu verwenden sein, welche man auf dem Objektträger des Projektionsmikroskops unter einem uhrglasförmigen Deckglase in Kontakt bringt. Beobachtet man die Kontaktzone mittels des Mikroskops, so scheiden sich hier keine Kristalle aus, wohl aber zu beiden Seiten derselben. Nur langsam wachsen sie in die Kontaktzone hinein,

Fig. 3050.



c b a

Fig. 3051.



a b c

ohne aber in gleicher Masse aufzutreten, wie an den übrigen Stellen. Mischkristalle bilden sich in diesem Falle nicht, auch nicht bei völligem Verdunsten des Lösungsmittels.

Fig. 3052.

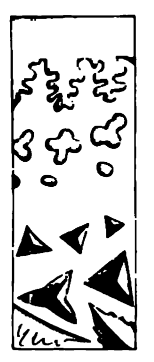
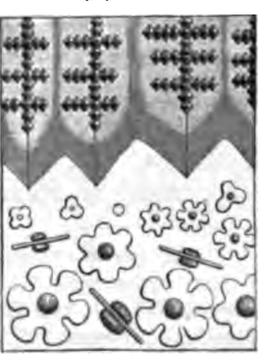


Fig. 3053.



438. Die Erniedrigung des Schmelzpunktes beim Kontakt zweier Körper, deren flüssige Modifikationen mischbar sind. Sehr schön läßt sich die Erscheinung beobachten bei Mischungen von Salpeter und salpetersaurem Blei. Schmilzt man die beiden Körper nebeneinander auf einem kleinen Objektträger und bedeckt sie mit einem Deckglase, so bleibt die Berührungszone

wesentlich länger flüssig als die Teile des Präparats, welche aus den reinen Substanzen bestehen. Umgekehrt tritt auch beim Erwärmen in dieser Zone das Schmelzen wesentlich früher ein, obschon sie nicht etwa aus einer chemischen Verbindung beider Substanzen, sondern nur aus einem feinkörnigen Gemenge besteht. (Eutektische Gemische.)

Fig. 3050 zeigt die Erscheinungen in der Mischungszone von Chlorsilber und Jodsilber, Fig. 3051 dieselben bei Jodsilber und Bromsilber, Fig. 3052 bei Jodsilber und Silbernitrat, Fig. 3053 bei Bleinitrat und Salpeter.

Das sogenannte Blut des heiligen Januarius ist eine mit Alkanna rot gefärbte Mischung von Wallrat und anderen Fetten, welche im kalten Zimmer erstarrt, im warmen flüssig wird [1]).

439. **Leichtflüssige Legierungen erhält man durch folgende Mischungen** [2]):

Wismut	Zinn	Blei	Schmelzpunkt	Wismut	Zinn	Blei	Schmelzpunkt
4	1	1	94° C.	4	8	—	167,7° C.
4	1½	2½	100	4	12	15	172
4	1½	4	107,5	0	5	1	194
4	2	4	123,3	4	32	—	200
4	3⅕	⅘	118,9		4	7	215
4	4	4	123,3		4	7½	221
4	4	5	130,3		4	8	228
4	4	6	132		4	8½	232
4	4	—	141,2		4	10	243
4	7	8	143,3		4	14	254
4	6	8	145,4		4	19	265
4	12	11	153,8		4	30	277
4	18	16	160,2		4	48	288
4	24	16	166,5		2	50	292

Die letzteren zehn Legierungen werden auch benutzt, um schneidende Instrumente in einer noch schmelzenden Masse derselben genau gleichförmig anlassen zu können, da dieses namentlich dann schwierig ist, wenn der anzulassende Gegenstand sehr lang oder sehr ungleich dick ist. Sie geben der Ordnung nach folgende Farben beim Anlassen des Stahls: Schwachgelb, Strohgelb, Goldgelb, Braungelb, Purpur, Violett, Dunkelblau, Hellblau.

Die leichtflüssigste Legierung erhält man nach Wood aus 1 bis 2 Tln. Cadmium, 7 bis 8 Wismut, 2 Zinn und 4 Blei; die Legierung schmilzt, je nachdem man mehr oder weniger Cadmium und Wismut genommen hat, bei 65 bis 71° C. und ist zum Löten brauchbar. Wenn man dieselbe bereitet, so schmilzt man zuerst das Blei und setzt die übrigen Teile nach der Ordnung ihrer Schmelzbarkeit zu. (Löffel, welcher im heißen Wasser schmilzt [Projektion], Stereotypplatten.)

[1]) Die gleichbenannte Reliquie wird in Neapel aufbewahrt. Die Masse, welche angeblich geronnenes Blut ist, soll sich unter Umständen in wunderbarer Weise verflüssigen, wenn sie dem Haupte des Heiligen genähert, d. h. wenn sie nacheinander von zahlreichen Personen kräftig geschüttelt wird, wobei natürlich die Wirkung der Handwärme nicht ausgeschlossen ist. — [2]) Bei gewöhnlicher Temperatur flüssige Legierung von Kalium und Natrium, in Glasröhren eingeschmolzen, liefert E. Merck, chemische Fabrik in Darmstadt, zu 0,5 Mk. pro Gramm.

440. Thermometrische Indikatoren[1]). In vielen Fällen reicht es aus, an n Ort, dessen Temperatur bestimmt werden soll, nacheinander kleine Stückchen von bstanzen mit immer niedrigeren Schmelzpunkten zu bringen, bis man diejenige reicht hat, die eben schmilzt, oder umgekehrt immer höher schmelzende, bis man t derjenigen angelangt ist, die nicht mehr schmilzt. Der Schmelzpunkt der be= effenden Substanz gibt dann annähernd die daselbst herrschende Temperatur. Es gnen sich hierzu namentlich Metalle und Salze. In folgender Tabelle sind einige lche nebst den zugehörigen Schmelzpunkten zusammengestellt[2]):

Legierung von			Legierung von		Legierung von
60°	Cd_{10}	$Sn_{13.3}$	432°	Sb	1035°	Au
	$Pb_{26.7}$	$Bi_{50.0}$	434	AgBr	1054	Cu
95	Sn_{25}	$Pb_{25}Bi_{50}$	450	AgCl	1100	$Au_{95}Pt_5$
125	$Pb_{27.2}$	$Bi_{72.8}$	498	$PbCl_2$	1130	$Au_{90}Pt_{10}$
136	$Sn_{29.8}$	$Bi_{70.2}$	527	AgJ	1160	$Au_{85}Pt_{15}$
146	$Cd_{21.2}$	$Bi_{78.8}$	541	$CdCl_2$	1190	$Au_{80}Pt_{20}$
168	$Zn_{4.2}$	$Pb_{26.9}Sn_{68.9}$	571	$CdBr_2$	1220	$Au_{75}Pt_{25}$
173	$Cd_{32.2}$	$Sn_{67.8}$	601	Cu_2J_2	1255	$Au_{70}Pt_{30}$
181	$Pb_{36.9}$	$Sn_{63.1}$	631	CaJ_2	1285	$Au_{65}Pt_{35}$
187	$Pb_{30.5}$	$Sn_{69.5}$	654	Ag_2SO_4	1320	$Au_{60}Pt_{40}$
190	$Zn_{69.5}$	$Pb_{30.5}$	666	KJ	1350	$Au_{55}Pt_{45}$
197	$Pb_{46.7}$	$Sn_{53.3}$	680	$CaBr_2$	1385	$Au_{50}Pt_{50}$
202	Zn_{50}	Pb_{50}	695	$MgBr_2$	1400	Ni
205	$Zn_{83.3}$	$Pb_{16.7}$	703	KBr	1420	$Au_{45}Pt_{55}$
230	Sn		708	$MgCl_2$	1460	$Au_{40}Pt_{60}$
235	$Pb_{63.7}$	$Sn_{36.3}$	723	$CaCl_2$	1495	$Au_{35}Pt_{65}$
240	Pb_{96}	Sb_{10}	730	KCl	1500	Pd
250	Zn_{82}	Sb_{18}	772	NaCl	1535	$Au_{30}Pt_{70}$
260	Bi		807	$Ag_{63}Cu_{37}$	1570	$Au_{25}Pt_{75}$
270	$Pb_{77.8}$	$Sn_{22.2}$	824	$Ag_{71.9}Cu_{28.1}$	1600	Fe
283	$Pb_{84.0}$	$Sn_{16.0}$	840	$Ag_{57.0}Cu_{43.0}$	1610	$Au_{20}Pt_{80}$
292	$Pb_{87.5}$	$Sn_{12.5}$	866	$Ag_{54.1}Cu_{45.9}$	1650	$Au_{15}Pt_{85}$
320	Cd		883	$Ag_{50}Cu_{50}$	1690	$Au_{10}Pt_{90}$
326	Pb		901	$Ag_{46}Cu_{54}$	1730	Au_5Pt_{95}
339	KNO_3		954	Ag	1775	Pt
383	PbJ		975	$Ag_{80}Au_{20}$	1950	Jr
404	CdJ		990	$Ag_{60}Au_{40}$		
412	Zn		1010	$Ag_{40}Au_{60}$		

441. Fritten und Sintern. Beim Erhitzen von Gemengen pulverförmiger örper erfolgt zuweilen, falls die Temperatur zur vollständigen Schmelzung nicht reicht, eine teilweise Schmelzung, infolge deren die Masse zusammen sintert und ach dem Erkalten infolge der Verkittung der Teilchen in eine harte aber poröse Masse rwandelt (gefrittet) erscheint. (Brennen von Ton und Porzellanwaren, Saigern, . h. Ausschmelzen des einen Bestandteils aus Metallegierungen.)

[1]) Bei Legierungen bedeuten die chemischen Zeichen nicht Atome und die Zahlen also icht Atomverhältnisse, sondern Prozente. Die Zahlen sind entnommen aus Landolt nd Börnstein, phys. Tabellen. — [2]) Metallegierungen zur ungefähren Bestimmung oher Temperaturen zwischen 315 und 1775° sind zu beziehen von Muencke, Berlin, das ramm zu 0,10 bis 6,00 Mk.

Hierher gehört das Pyrometer von Wedgewood (Fig. 3054 Lb, 26), dessen Wirkung auf dem Zusammensinken eines Tonkörpers in der Hitze beruht. Die entstandene Dickenänderung des Tonkörpers wird nach der Abkühlung mittels eines geeigneten Dickenmessers gemessen und hieraus die Temperatur ermittelt, welcher der Tonkörper ausgesetzt war[1]). (Biegen von Möbelholz, Horn, Ebonit durch Erwärmen; Erstarren von Kautschuk in der Kälte.)

Fig. 3054.



Fig. 3055.



442. **Anomale Schmelz- und Erstarrungsvorgänge.** Das sogen. Schmelzen im Kristallwasser beruht auf der Bildung zweier Lösungen, von welchen die eine viel, die andere wenig Wasser enthält. Faßt man die Kristallwasserverbindungen als chemische Verbindungen (Molekularverbindungen) auf, so kann man die Erscheinung als Dissoziationserscheinung bezeichnen.

Eigentümliche Polymerisationserscheinungen beobachtete Kronstein bei langandauerndem Erhitzen organischer Körper wie Leinöl, Styrol u. s. w. Die Flüssigkeit wird plötzlich fest und unlöslich mit ähnlichen Eigenschaften wie Bernstein. Hierauf beruht die Anwendung des Elektralacks[2]).

Kryostaz nannte C. E. Helbig eine in der Wärme erstarrende Mischung aus gleichen Teilen Phenol, Campher und Zaponlack. Die bei gewöhnlicher Temperatur feste Mischung wird bei Abkühlung auf 0° flüssig und bleibt flüssig bis 70°. Durch Einwirkung der atmosphärischen Luft verändert sich die Masse und man kann hierdurch Mischungen erhalten, welche schon bei Zimmertemperatur flüssig werden. (Siehe Prometheus 6, 182, 1895 und Beibl. 19, 450, 1895.)

443. **Gelatinieren und Gerinnen.** Gewöhnlichen Tischlerleim oder Gelatine läßt man 24 Stunden in Wasser aufquellen, schüttet dann das Wasser ab und er-

[1]) Segerkegel zur Beobachtung des Fortschreitens der Hitze in Öfen und Feuerungsanlagen liefert 100 Stück zu 7 Mk. Fr. Hugershoff, Leipzig, Karolinenstr. 13 (Fig. 3055), sowie Dr. H. Rohrbeck, Berlin NW., Karlstr. 20a, und Dr. Muencke, Berlin. — [2]) Zu beziehen von der Deutschen Elektra-Lack-Fabrik, G. m. b. H. in Bruchsal (Baden), indirekt von der Gesellschaft für elektrische Industrie in Karlsruhe.

440. Thermometrische Indikatoren[1]). In vielen Fällen reicht es aus, an den Ort, dessen Temperatur bestimmt werden soll, nacheinander kleine Stückchen von Substanzen mit immer niedrigeren Schmelzpunkten zu bringen, bis man diejenige erreicht hat, die eben schmilzt, oder umgekehrt immer höher schmelzende, bis man bei derjenigen angelangt ist, die nicht mehr schmilzt. Der Schmelzpunkt der betreffenden Substanz gibt dann annähernd die daselbst herrschende Temperatur. Es eignen sich hierzu namentlich Metalle und Salze. In folgender Tabelle sind einige solche nebst den zugehörigen Schmelzpunkten zusammengestellt[2]):

Legierung von		Legierung von		Legierung von	
60°	Cd_{10} $Sn_{13,3}$ $Pb_{26,7}$ $Bi_{50,0}$	432°	Sb	1035°	Au
95	Sn_{25} Pb_{25} Bi_{50}	434	$Ag\,Br$	1054	Cu
125	$Pb_{27,2}$ $Bi_{72,8}$	450	$Ag\,Cl$	1100	Au_{95} Pt_5
136	$Sn_{29,8}$ $Bi_{70,2}$	498	$Pb\,Cl_2$	1130	Au_{90} Pt_{10}
146	$Cd_{21,2}$ $Bi_{78,8}$	527	$Ag\,J$	1160	Au_{85} Pt_{15}
168	$Zn_{4,2}$ $Pb_{26,9}$ $Sn_{68,9}$	541	$Cd\,Cl_2$	1190	Au_{80} Pt_{20}
173	$Cd_{32,2}$ $Sn_{67,8}$	571	$Cd\,Br_2$	1220	Au_{75} Pt_{25}
181	$Pb_{36,9}$ $Sn_{63,1}$	601	$Cu_2\,J_2$	1255	Au_{70} Pt_{30}
187	$Pb_{30,5}$ $Sn_{69,5}$	631	$Ca\,J_2$	1285	Au_{65} Pt_{35}
190	$Zn_{69,5}$ $Pb_{30,5}$	654	$Ag_2\,SO_4$	1320	Au_{60} Pt_{40}
197	$Pb_{46,7}$ $Sn_{53,3}$	666	$K\,J$	1350	Au_{55} Pt_{45}
202	Zn_{50} Pb_{50}	680	$Ca\,Br_2$	1385	Au_{50} Pt_{50}
205	$Zn_{83,3}$ $Pb_{16,7}$	695	$Mg\,Br_2$	1400	Ni
230	Sn	703	$K\,Br$	1420	Au_{45} Pt_{55}
235	$Pb_{63,7}$ $Sn_{36,3}$	708	$Mg\,Cl_2$	1460	Au_{40} Pt_{60}
240	Pb_{90} Sb_{10}	723	$Ca\,Cl_2$	1495	Au_{35} Pt_{65}
250	Zn_{82} Sb_{18}	730	$K\,Cl$	1500	Pd
260	Bi	772	$Na\,Cl$	1535	Au_{30} Pt_{70}
270	$Pb_{77,8}$ $Sn_{22,2}$	807	Ag_{63} Cu_{37}	1570	Au_{25} Pt_{75}
283	$Pb_{84,0}$ $Sn_{16,0}$	824	$Ag_{71,9}$ $Cu_{28,1}$	1600	Fe
292	$Pb_{87,5}$ $Sn_{12,5}$	840	$Ag_{57,0}$ $Cu_{43,0}$	1610	Au_{20} Pt_{80}
320	Cd	866	$Ag_{54,1}$ $Cu_{45,9}$	1650	Au_{15} Pt_{85}
326	Pb	883	Ag_{50} Cu_{50}	1690	Au_{10} Pt_{90}
339	KNO_3	901	Ag_{46} Cu_{54}	1730	Au_5 Pt_{95}
383	$Pb\,J$	954	Ag	1775	Pt
404	$Cd\,J$	975	Ag_{80} Au_{20}	1950	Jr
412	Zn	990	Ag_{60} Au_{40}		
		1010	Ag_{40} Au_{60}		

441. Fritten und Sintern. Beim Erhitzen von Gemengen pulverförmiger Körper erfolgt zuweilen, falls die Temperatur zur vollständigen Schmelzung nicht zureicht, eine teilweise Schmelzung, infolge deren die Masse zusammen sintert und nach dem Erkalten infolge der Verkittung der Teilchen in eine harte aber poröse Masse verwandelt (gefrittet) erscheint. (Brennen von Ton und Porzellanwaren, Saigern, d. h. Ausschmelzen des einen Bestandteils aus Metallegierungen.)

[1]) Bei Legierungen bedeuten die chemischen Zeichen nicht Atome und die Zahlen also nicht Atomverhältnisse, sondern Prozente. Die Zahlen sind entnommen aus Landolt und Börnstein, phys. Tabellen. — [2]) Metallegierungen zur ungefähren Bestimmung hoher Temperaturen zwischen 315 und 1775° sind zu beziehen von Muencke, Berlin, das Gramm zu 0,10 bis 6,00 Mk.

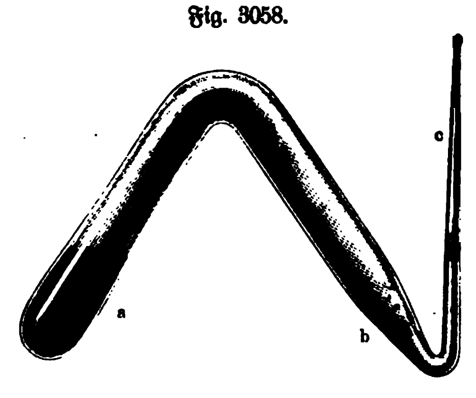
Zum Nachweis der Dissociationstension nach **Isambert** dürfte besonders ein zugeschmolzenes V-förmiges Glasrohr geeignet sein, welches Chlorsilberammoniak als zersetzbare Substanz enthält[1]).

Sehr schön gestaltet sich der Versuch nach **Polis**, wenn man das frei werdende Ammoniakgas sich in einem zur Projektion geeigneten Apparate, wie ihn **Landolt** für die Demonstration der Verflüssigung von Cyangas benutzt, durch seinen eigenen Druck verflüssigen läßt. Ein, wie Fig. 3058 zeigt, gebogenes und beiderseits zugeschmolzenes Glasröhrchen enthält bei *a* etwas Chlorsilberammoniak. Erwärmt man dieses Ende durch eine untergesetzte kleine Flamme, so kondensieren sich im Schenkel *b* Tropfen von flüssigem Ammoniak, welche allmählich zusammenfließen. Der verjüngt zulaufende Schenkel *c* dient als Manometer. Ein kleines darin befindliches Quecksilbertröpfchen wird in dem Maße, wie der Druck steigt, darin in die Höhe getrieben. Wird die Flamme entfernt, so wird das Ammoniak von dem Chlorsilber wieder absorbiert, die flüssige Schicht verschwindet allmählich und das Quecksilbertröpfchen des Manometers bewegt sich in seine Anfangslage zurück.

Fig. 3057.



Fig. 3058.



Verdichtet man in **Cailletets** Apparat (§ 817, S. 1021) langsam ein Gemenge aus gleichen Raumteilen Phosphorwasserstoff- und Chlorwasserstoffgas bei 12 bis 15°, so bilden sich in der Kapillarröhre Kristalle von **Phosphoniumchlorid**; bei Kompression über 20° werden Tröpfchen der geschmolzenen Verbindung erhalten. Der Versuch kann beliebig oft wiederholt und durch Projektion einer größeren Zuhörerzahl sichtbar gemacht werden (**Heumann-Kühling**).

Lamys Dissociationspyrometer beruht auf der Dissociationsspannung der Kohlensäure beim Erhitzen von kohlensaurem Kalk. Das **Dissociationsthermometer** beruht auf der Dissociationstension des Ammoniaks in der Verbindung $CaCl_2, 4NH_3$. Diese Instrumente besitzen lediglich theoretischen Wert, da der Eintritt des Gleichgewichtszustandes nach einer Temperaturänderung allzuviel Zeit in Anspruch nimmt.

[1]) Einen hierzu dienlichen Apparat nach Fig. 3057 liefern **Leybolds Nachf.**, Köln, zu 20 Mk.

Wird nach Böttinger (1878) ein Kugelröhrchen aus schwer schmelzbarem Glase (d. h. eine Glaskugel mit diametral gegenüberliegenden, entgegengesetzt gerichteten Rohransätzen) mit etwas Salmiak beschickt und in die beiden Rohransätze je ein Streifen mit blauem oder rotem Lackmuspapier gebracht, und neigt man nun die Röhre derart, daß das Ende mit dem roten Papier höher, das andere tiefer liegt, und erhitzt, so nehmen die Papierstreifen entgegengesetzte Färbung an, da der obere durch das aufsteigende leichtere Ammoniak gebläut, der tiefere durch die schwerere, niedersinkende Salzsäure gerötet wird.

447. Sublimation. Sehr schön läßt sich dieselbe mittels des Projektionsmikroskops mit Jod zeigen. Man bringt auf einen Objektträger einige Körnchen Jod, deckt darüber ein flaches Uhrglas, die konkave Seite nach unten, und kühlt letzteres durch einen Luftstrom von oben ab. Bald, namentlich beim Erwärmen, beginnen sich auf der abgekühlten Fläche schwarze, d. h. undurchsichtige, sehr regelmäßige Jodkristalle auszuscheiden, ähnlich wie die Tröpfchen bei Destillation von Quecksilber.

Nach L. Meyer (1875) bringt man in zwei gleiche, 20 bis 30 mm weite und 0,3 bis 0,4 m lange, einerseits zugeschmolzene Glasröhren Jod, zieht die Röhren am oberen Ende aus, pumpt die eine derselben möglichst luftleer, während man in der anderen die Luft durch Erwärmen

Fig. 3059.

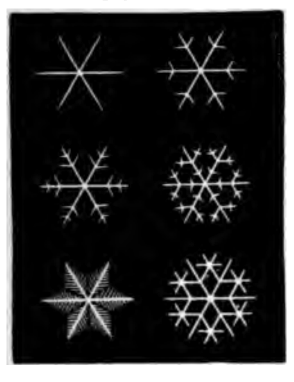
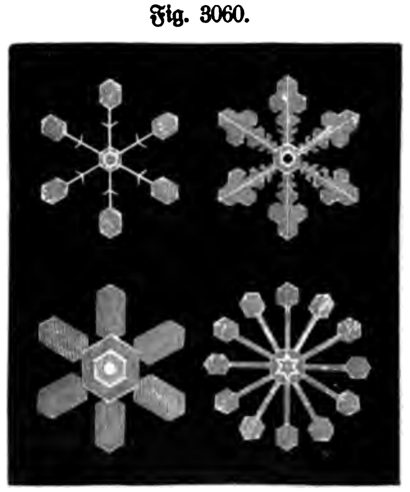


Fig. 3060.



etwas verdünnt, und schmilzt beide Röhren zu. Erhitzt man nun das Jod, so schmilzt das im lufthaltigen Rohr, während sich ein intensiver, fast undurchsichtiger Dampf entwickelt. Im luftleeren Rohr dagegen schmilzt das Jod nicht, sondern verdampft sofort und der Dampf ist ganz durchsichtig und wenig intensiv, da er sich an den kälteren Teilen des Röhrchens sofort wieder kondensiert, so daß er keine merkliche Spannung erlangen kann. Der Versuch eignet sich auch gut zur Projektion. Eine kritische Temperatur (Quecksilber?) existiert nicht.

Die Gestalt freischwebend gebildeter Eiskristalle (Schneesterne) kann durch Tafeln (Fig. 3059 und 3060) und Projektion von Photographien demonstriert werden, wie solche neuerdings namentlich von Neuhauß hergestellt worden sind.

Wird nach Haas (1881) ein Stück Quecksilberchlorid in eine starkwandige, einerseits zugeschmolzene Glasröhre gebracht, deren offenes Ende mit einer Wasserluftpumpe u. s. w. in Verbindung steht und alsdann unter 400 mm Druck (Tension des Dampfes beim Schmelzpunkte) erhitzt, so findet Sublimation statt. Oberhalb

400 mm Druck tritt zuerst Schmelzung ein. Mit Hilfe des Projektionsapparates kann man die Erscheinung objektiv machen.

Ein schönes Beispiel der Sublimation ist die von selbst erfolgende Bildung von Jodcyan in langen dünnen Kristallnadeln aus einem Gemenge von Cyan-Quecksilber und Jod in einer geschlossenen Flasche.

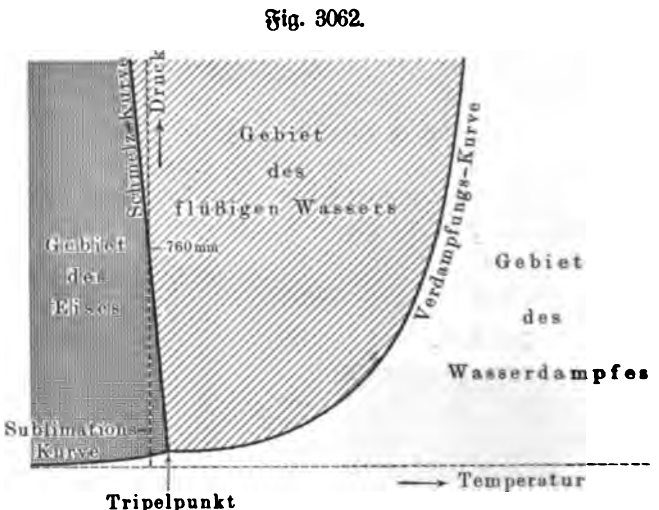
Fig. 3061.



In evakuierten zugeschmolzenen Röhren (Fig. 3061 Lb, 8) kann man nach Weinhold sehr gut die Sublimation des Eises zeigen, indem man den leeren Teil der Röhre in einer Kältemischung abkühlt.

Nach Kahlbaum lassen sich auch manche Metalle bei relativ niedriger Temperatur im Vakuum sublimieren und dadurch reinigen.

Fig. 3062.



448. Umwandlungskurven. Trägt man, wie Fig. 3062 andeutet, als Abscissen die Temperaturen, als Ordinaten die zugehörigen Drucke in ein Koordinatensystem ein, so stellt die Dampftensions- oder Verdampfungskurve die Grenze zwischen dem Gebiet des Wasserdampfes und dem des flüssigen Wassers dar, denn Erhöhung des Drucks über den Sättigungsdruck ist nur möglich bei vollständiger Kondensation des Dampfes zu flüssigem Wasser, Erniedrigung der Temperatur auf 0° bei 760 mm Druck bedingt Gefrieren des Wassers. Dieser Punkt ist also ein Punkt der Umwandlungskurve des flüssigen Wassers in Eis, der Schmelzkurve, welche das Gebiet des flüssigen Wassers von dem des Eises trennt. Sie trifft die Verdampfungskurve in dem sogen. Tripelpunkt, von welchem als Grenze zwischen dem Gebiet des Dampfes und dem des Eises die Sublimationskurve ausgeht. Diese sogen. Umwandlungskurven geben eine bequeme Übersicht über die Umwandlungserscheinungen, welche dem System der Isothermen (Druckkurven, vergl. S. 995 und 1109) in manchen Fällen vorzuziehen ist, da bei diesem die Flächen, welche den flüssigen und festen Modifikationen entsprechen, zu klein ausfallen.

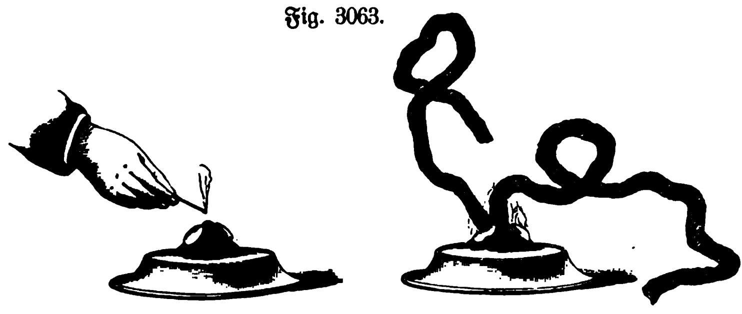
Bei komplizierteren Systemen, z. B. bei einem Gemisch von schwefliger Säure und Wasser, lassen sich auch Punkte, in welchen vier und noch mehr Kurven zusammentreffen, beobachten. Nach der Phasenregel von Gibbs ist die Maximalzahl der Phasen, die in einem Punkte koexistieren können, um zwei größer als die Zahl der chemischen Komponenten. Bei Wasser allein ist die Zahl der Kom-

nten eins, also die Maximalzahl der koexistierenden Phasen drei, bei dem Gemisch mit schwefliger Säure würde sich ein vierfacher Punkt beobachten lassen.

449. Die Umwandlung von Phosphor. Um dieselbe zu demonstrieren, schließt W. Meyer (1882) eine Quantität von gelbem Phosphor in eine kurze dickwandige Glasröhre ein, welche oben in eine hakenförmig gebogene Kapillare endigt, und erhitzt diese im Dampfe von Diphenylamin. Der Phosphor verwandelt sich in eine feuerrote Masse. Der Dampf des gelben Phosphors kann also zu rotem erstarren.

450. Pharaoschlange. Erhitzt man Emser Pastillen (im wesentlichen ein Gemisch von Zucker und doppeltkohlensaurem Natron) in einer Spiritusflamme (am einfachsten auf mit Spiritus getränkter Zigarrenasche), so entsteht ein äußerst voluminöser Körper, da infolge Zersetzung des Natronbikarbonats sich reichlich Kohlen-

Fig. 3063.



säure bildet, welche den geschmolzenen Zucker zu einer schaumigen Masse aufbläht (Fig. 3063 [1]), die dann infolge der steigenden Temperatur verkohlt. Ähnliche voluminöse Körper entstehen bei manchen Feuerwerkskörpern, insbesondere der sogenannten Pharaoschlange, welche indes infolge der Bildung giftiger Dämpfe (Cyanquecksilber) nicht ganz ungefährlich ist.

451. Die trockene Destillation von Holz, die Leuchtgasbereitung und ähnliche Fälle irreversibler Zersetzung können schon in einem Reagenzglas gezeigt werden. Man weise namentlich darauf hin, daß durch Abkühlung des Gases der frühere Stoff nicht wieder erhalten wird.

Fig. 3064.

452. Verbrennung. Zur Erläuterung der Lehre von der Verbrennung des Talges und Wachses u. s. w., also der Körper, welche vorher erst in brennbare Produkte zersetzt werden, kann man folgende Versuche machen:

a) Man zündet einen Wachsstock an und bläst ihn aus, wenn er gehörig brennt; nähert man nun der aufsteigenden Säule der noch durch die Hitze des Dochtes erzeugten brennbaren Gase ein Licht, so entzünden sich dieselben, die Flamme fährt schnell an den Docht zurück und die Kerze brennt wieder [2]).

b) Senkt man ein auf einen umgebogenen Draht gestecktes Wachslicht langsam in einen mit Kohlensäure gefüllten Cylinder,

[1]) Nach Donath, Physikalisches Spielbuch, Fig. 156. — [2]) Fig. 3064 zeigt einen von Dr. Stöhrer u. Sohn in Leipzig zu beziehenden Apparat, welcher ermöglicht, der Flamme Leuchtgas zu entnehmen.

so erlischt die Flamme am Docht, aber die aufsteigenden Gase brennen oberhalb der Kohlensäure noch einige Zeit fort und man kann die Wachskerze an diesem Flämmchen wieder anzünden, wenn man sie wieder aus der Kohlensäure hebt.

c) Um zu zeigen, daß ein Licht in verdünnter Luft im Rezipienten einer Luftpumpe erlischt, wähle man ein niedriges Wachslicht und eine etwas hohe Glasglocke, damit die Erhitzung an der Stelle des Knopfes derselben nicht etwa ein Springen veranlaßt. Das Licht löscht übrigens nach wenigen Zügen aus.

d) Verbrennung von Eisen nach Magnus. Man taucht den Pol eines Magnetstabes in feine Eisenfeile, wie sie in den Apotheken als limatura ferri alcoholisata gehalten wird; den daran hängenbleibenden Bart kann man nun mit einem Streichhölzchen anzünden. Verwendet man dazu einen Hufeisenmagnet, dessen beide Pole in die Eisenfeile getaucht waren, hängt denselben an einer Wage auf und stellt das Gleichgewicht her, so kann man nach Hofmann die beim Verbrennen der Eisenfeile stattfindende Gewichtszunahme zeigen.

Um zu zeigen, daß das Gewicht von verbrennendem Stoff und Luft zusammen durch Verbrennung nicht geändert wird, bedient sich v. Than (1879) einer Glasröhre von 2 cm Durchmesser und 15 cm Länge, welche mit 2 cg frisch ausgeglühter pulverförmiger Holzkohle und trockenem Sauerstoff gefüllt ist. Beim Füllen schmilzt man erst das eine Ende der Röhre zu, zieht das andere aus, füllt durch dieses die Kohle ein und verdrängt durch ein bis auf den Boden reichendes Kapillarrohr die Luft durch Sauerstoff und schmilzt nun auch das ausgezogene Ende zu. Man tariert die Röhre auf einer Wage, erwärmt dann den Boden, bis die Kohle zu brennen anfängt, und schüttelt, bis die Kohle vollständig unter glänzender Verbrennungserscheinung verschwunden ist. Hierauf läßt man erkalten und bringt die Röhre wieder auf die Wage. Das Gewicht erscheint ungeändert.

453. Die drei Aggregatzustände oder Phasen. Der Umstand, daß die meisten Körper früher nur in einer festen Modifikation bekannt waren, sowie in einer flüssigen und einer gasförmigen, hat Anlaß gegeben zu der unrichtigen Lehre, daß jeder Körper in drei Aggregatzuständen auftrete. Tatsächlich besitzt z. B. das salpetersaure Ammoniak fünf [1]) feste Modifikationen, deren Umwandlung ineinander ganz dem Prozeß des Schmelzens oder Erstarrens, sowie des Siedens und der Kondensation entspricht. Bei manchen Stoffen, wie z. B. Jodsilber, Cholesterylbenzoat oder Paraazoxybenzoesäureäthylester ist eine der festen kristallisierten Modifikationen so weich, daß man sie für eine Flüssigkeit halten möchte; p-Azoxyanisol und p-Azoxyphenetol, sowie andere Stoffe haben zwei flüssige Modifikationen, von denen die eine kristallinisch ist und sich nicht mit der andern mischt.

Schwefel, Jod u. s. w. haben zwei gasförmige Modifikationen von verschiedener Dichte. Man kann also nur sagen, daß sich die Modifikationen, in denen ein Körper auftreten kann, in drei Gruppen, nämlich feste, flüssige und gasförmige bringen lassen, keineswegs aber, daß die Zahl der Modifikationen nur drei beträgt, d. h. der der möglichen Aggregatzustände gleich ist.

Unrichtig ist es auch, diese sogenannten Zustandsänderungen als grundsätzlich verschieden zu betrachten von stofflichen Änderungen, insofern die Existenz der flüssigen

---

[1]) Neuerdings beobachtete ich eine noch unbekannte fünfte enantiotrope Modifikation (vergl. S. 1139) bei starker Abkühlung.

kristalle beweist, daß Änderung der Molekularanordnung keine Änderung der physikalischen Eigenschaften, insbesondere von Löslichkeit und Schmelzpunkt bedingt, die Verschiedenheit der Modifikationen, sowie auch die Verschiedenheit des kristallisierten und amorphen Zustandes nicht durch die Anordnung der Moleküle bedingt sein kann.

Achtes Kapitel.

Wärmemenge.

454. Spezifische Wärme. Nach der alten Stofftheorie der Wärme haben die Körper verschiedene Kapazität für das Wärmefluidum, was man sich etwa durch verschiedene Größe ihrer Poren bedingt denken kann. Als Wärmemenge 1 oder eine Kalorie bezeichnet man die Wärmemenge, die nötig ist, 1 kg Wasser von gewöhnlicher Temperatur um 1° C. (von 14½° auf 15½° des Wasserstoffthermometers) zu erwärmen[1]). Man kann sich leicht davon überzeugen, daß für eine beliebige andere Temperatur die zur Steigerung derselben nötige Wärmemenge um 1° (die spezifische Wärme) fast genau dieselbe ist.

Mischt man z. B. 2 kg Wasser von 10° mit 1 kg Wasser von 100°, so erhält man 3 kg Wasser von 40° (Richmannsche Regel). Die 2 kg Wasser von 10° haben 60 Kalorien aufgenommen, welche das 1 kg Wasser von 100° abgegeben hat.

Wollte man den ganzen Wärmeinhalt einer Substanz, z. B. von 1 kg Wasser erfahren, so müßte man sie eigentlich zunächst auf den absoluten Nullpunkt, bei welchem sie gar kein Wärmefluidum enthält (— 273°), abkühlen und nun Grad für Grad erwärmen und die zugeführten Kalorien zusammenzählen. Dies ist natürlich unausführbar; man rechnet deshalb gewöhnlich den Wärmeinhalt vom Gefrierpunkte des Wassers an, wobei stillschweigend vorausgesetzt wird, daß hierzu noch die vom absoluten Nullpunkte bis dahin zugeführte Wärme addiert werden muß. Das Weglassen dieses Summanden rechtfertigt sich dadurch, daß man immer nur mit Differenzen von Wärmemengen zu rechnen hat, so daß er also doch ohnehin aus den Formeln fortfallen würde.

[1]) Wollte man konsequent sein, so müßte man im technischen System statt 1 kg Wasser 1 Hyl (vergl. § 69) wählen, im absoluten System 1 g. Letztere Wärmemenge wird gewöhnlich als kleine Kalorie bezeichnet. Da indes der Grad Celsius als neue Einheit hinzukommt, paßt die kleine Kalorie nicht ohne weiteres zu den C G S-Einheiten. Wie später im XII. Kapitel dargelegt wird, sind sowohl die Kalorie, wie der Grad Celsius unnötige Einheiten. Da Wärme eine Form von Energie ist, ist die naturgemäße Einheit im technischen System das Kilogrammmeter, im absoluten System das Erg. Als Einheit der Temperatur könnte man diejenige bezeichnen, auf welche 1 Hyl bezw. Gramm Wasser gebracht wird bei Zuführung von 1 kgm bezw. 1 Erg Wärme. Da diese Einheiten nicht gebräuchlich sind und die Gründe, weshalb dieselben berechtigt erscheinen, an dieser Stelle noch nicht dargelegt werden können, bleibt als einzige Möglichkeit für den Unterricht der Gebrauch der üblichen Einheiten.

Außer der genannten Warburgschen 15° Kalorie sind noch in Gebrauch Regnaults Kalorie, d. h. die Wärme zur Erwärmung von 1 kg Wasser von 0° auf 1° (= 1,006 Warburgschen Kalorien) und die Wüllnersche Kalorie, d. h. der 100. Teil der Wärmemenge, welche 1 kg Wasser von 0° auf 100° bringt (= 1,003 Warburgschen Kalorien). Elektrotechniker gebrauchen zuweilen das Joule = 10^7 Erg.

Anders als die Mischung von kaltem und heißem Wasser verhält sich eine Mischung von kaltem Petroleum und heißem Wasser. Die spezifische Wärme des Petroleums, d. h. die zur Erwärmung der Masse von 1 kg um 1° erforderliche Wärmemenge ist nur etwa die Hälfte der für eine gleiche große Wassermenge nötigen. Mischt man also 2 kg Petroleum von 10° und 1 kg Wasser von 100°, so entsteht eine Mischtemperatur von 55°. Umgekehrt kann man, wenn diese Mischtemperatur bekannt ist, daraus die spezifische Wärme des Petroleums ableiten.

Zu empfehlen ist auch eine Mischung von Quecksilber und Wasser, um die geringe Kapazität des ersteren (etwa $^1/_{30}$) darzutun.

Als Mischgefäße benutzt man am einfachsten große Bechergläser, welche, um Wärmeverluste tunlichst zu vermeiden, auf eine Filzunterlage gesetzt werden. Die Temperatur wird mittels eines Luftthermoskops bestimmt und durch Rühren mit einem steifen Draht, an welchen eine kleine Blechscheibe angenietet ist, dafür gesorgt, daß die Temperaturverteilung eine gleichmäßige wird.

Über die verschiedenen Korrekturen bei kalorimetrischen Messungen siehe Kohlrausch, Lehrbuch der prakt. Physik, S. 183 u. ff.

Insbesondere ist zum Gewichte des Wassers auch der Wasserwert (Gewicht × spezifische Wärme) von Gefäß und Thermometer zuzurechnen.

Beispielsweise findet man die spezifische Wärme von:

Eisen	0,11	Blei	0,03
Messing	0,09	Quecksilber	0,03
Aluminium	0,22	Glas	0,19
Platin	0,03	Terpentinöl	0,50
Granit	0,19	Alkohol	0,60
Sandstein	0,22	Schwefelkohlenstoff	0,23

Die spezifische Wärme des Wassers ist weitaus die größte (langsame Abkühlung bezw. Erwärmung der Meere, Milderung der Winterkälte und Sommerhitze). Sie ändert sich mit der Temperatur nach folgender Tabelle:

0°	5°	10°	15°	20°	30°	50°
1,0065	1,0044	1,0017	1,0000	0,9988	0,9986	1,003.

455. **Wasserkalorimeter.** Bezüglich der Kalorimeter von Regnault[1]) Fig. 3065 Lb, 275, Fig. 3066 (speziell für sehr niedrige Temperaturen) Lb, 80, von Favre und Silbermann (Quecksilberkalorimeter) (Fig. 3067 E, 82), von Kopp (Fig. 3068 E, 25) u. s. w. muß auf die Lehrbücher der physikalischen Maßbestimmungen verwiesen werden.

Ein einfaches Kalorimeter zeigt Fig. 3065 (Lb, 275). Dasselbe ist zum Schutz gegen Wärmeverluste von einer polierten Schutzhülle umgeben. Ein anderes einfaches Kalorimeter nach Weinhold, bei welchem die Substanz nicht direkt mit dem Wasser in Berührung kommt, zeigt Fig. 3069 (Lb, 17); Fig. 3070 ist der zugehörige Erhitzungsapparat. Verschiedene Dampfheizapparate zur Erhitzung der Substanzen auf 100° sind in den Fig. 3071 (K, 20) und 3072 (K, 50) dargestellt[2]).

---

[1]) Die Regnaultschen Apparate liefert Mechaniker Golaz in Paris 24, Rue des Fossés St. Jacques. — [2]) Ein Mischkalorimeter nach Fig. 3073 ist zu beziehen von Dr. Edelmann in München zu 100 Mk.; ein Kalorimeter nach E. Wiedemann für Flüssigkeiten nach Fig. 3074 von Dr. Stöhrer u. Sohn, Leipzig; Kalorimeter für technische Zwecke liefert Dr. Hermann Rohrbeck, Berlin NW., Karlstr. 20 a.

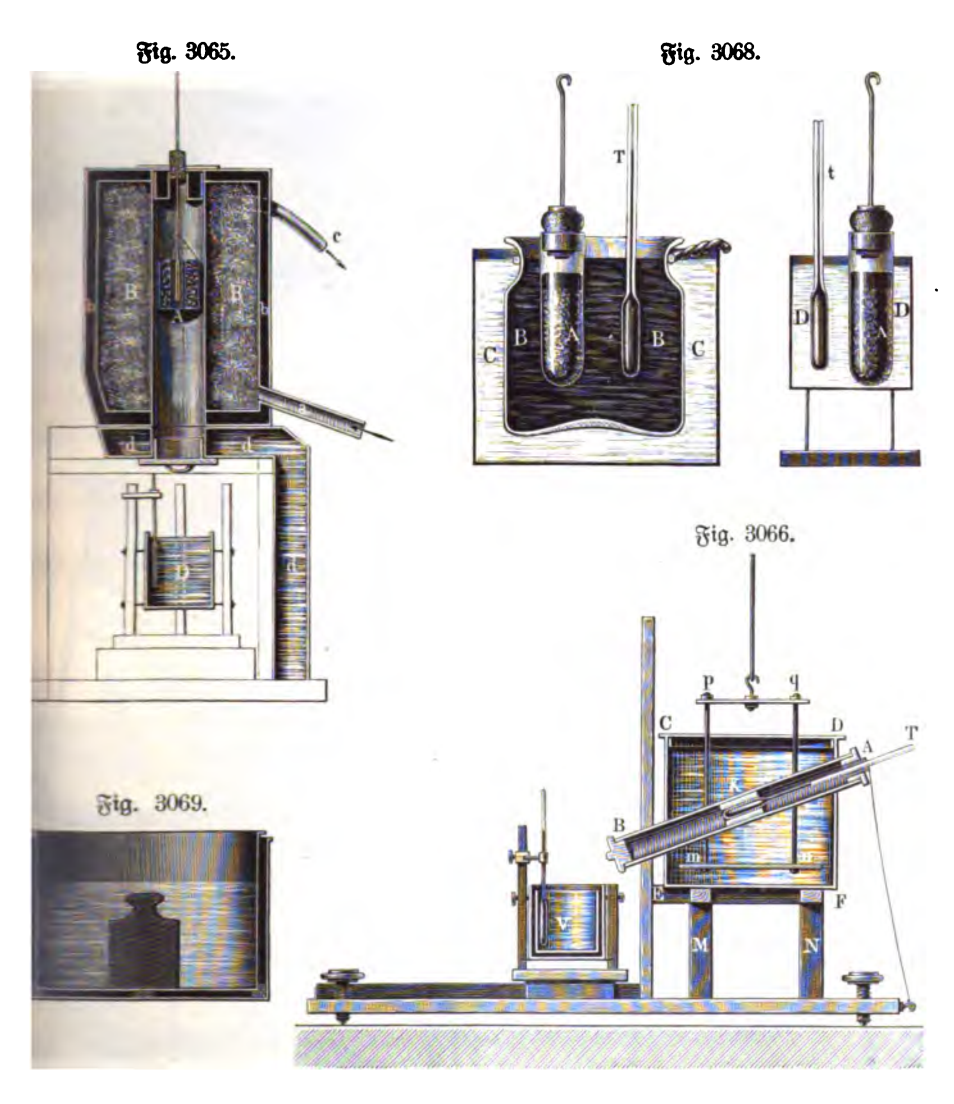


Fig. 3065.

Fig. 3068.

Fig. 3066.

Fig. 3069.

Fig. 3067.

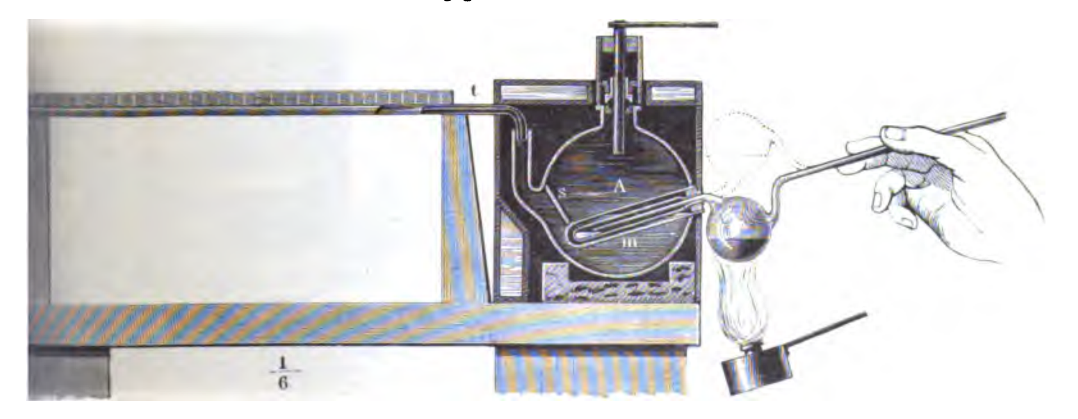
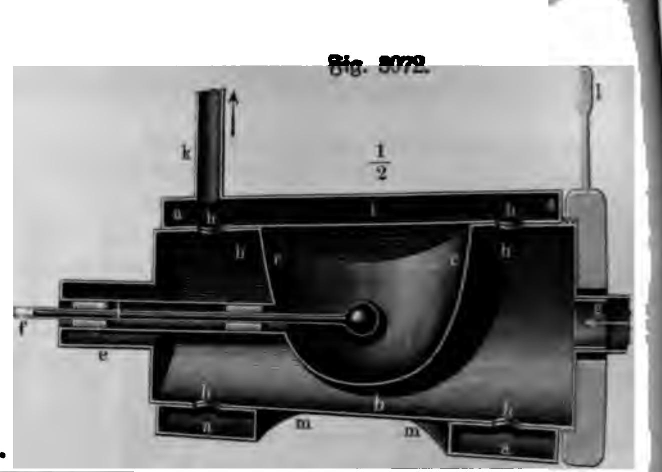


Fig. 3070.



Fig. 3072.



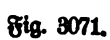


Fig. 3071.



Fig. 3074.



Fig. 3073.

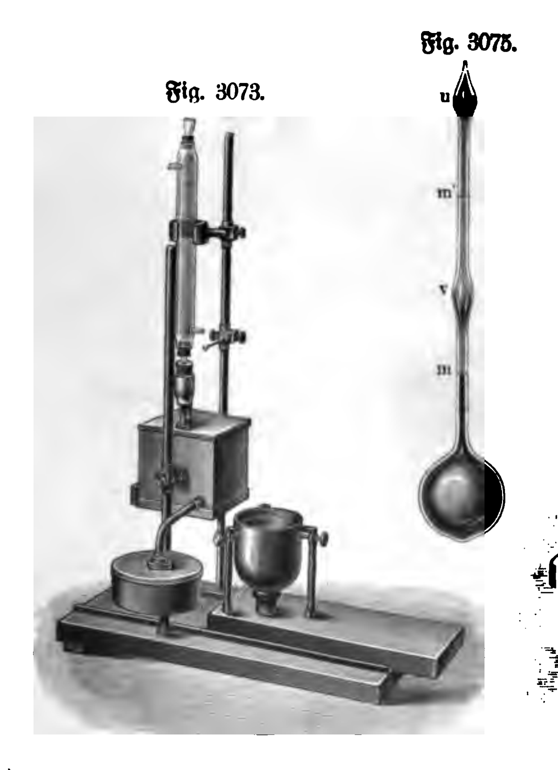
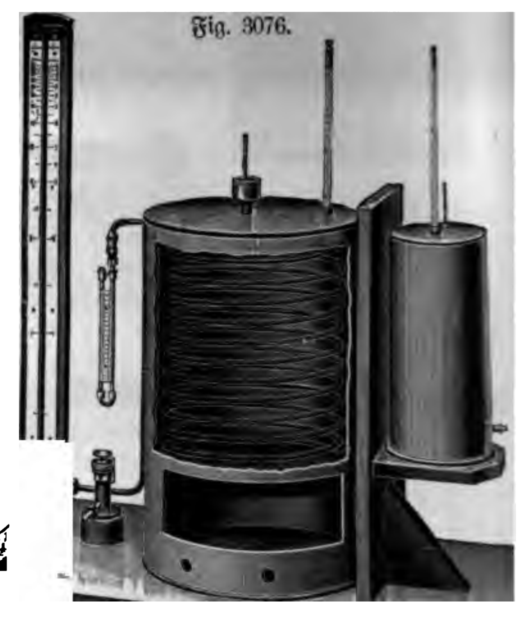


Fig. 3075.

Fig. 3076.



Ein bequemes Mittel zur Bestimmung der spezifischen Wärme von Flüssigkeiten ist Andrews Kalorifer (Fig. 3075 Lb, 13). Man wiegt in zwei Bechergläsern gleiche Mengen Wasser und der zu untersuchenden Flüssigkeit ab, erhitzt das Kalorifer, bis das Quecksilber in der Röhre über der oberen Marke steht, läßt abkühlen, bis diese erreicht ist, und taucht es dann in das Wasser, bis die untere Marke erreicht ist. Hierauf wiederholt man den Versuch, indem man das Kalorifer in die zu untersuchende Flüssigkeit eintaucht. Das Verhältnis der Temperaturerhöhungen in beiden Fällen gibt direkt die gesuchte spezifische Wärme, da diejenige des Wassers = 1 gesetzt werden kann.

Zur Bestimmung der spezifischen Wärme von Gasen bei konstantem Drucke dient der Apparat von Regnault (Fig. 3076 K, 275), sowie der Apparat

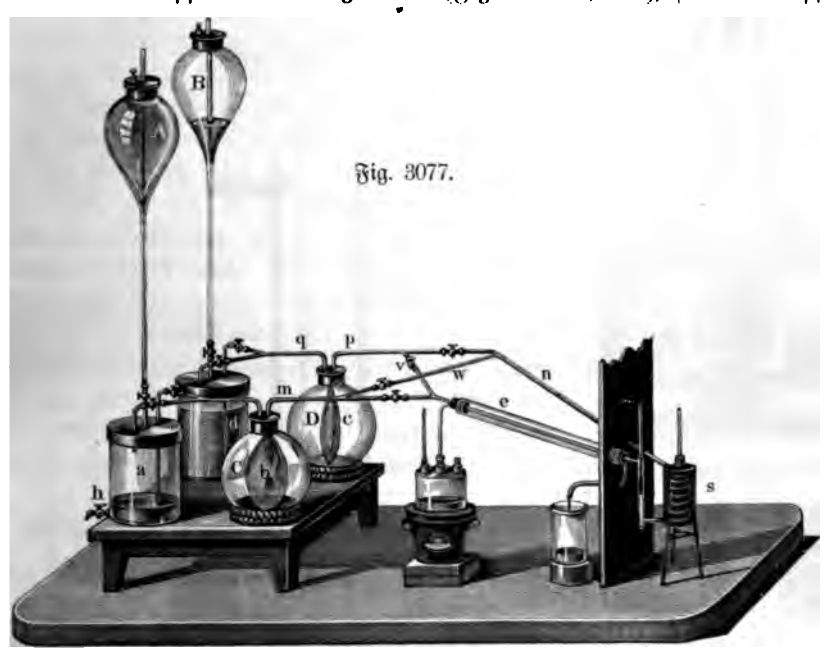


Fig. 3077.

von de la Roche und Bérard (Fig. 3077 Lb, 220). Einfacher wird der gleiche Zweck erreicht mit der Schlauchpumpe von Prytz, zu beziehen von Fueß, Steglitz bei Berlin, Düntherstr. 8, zu 75 Mk.

Man findet beispielsweise für:

Sauerstoff	0,218	Atmosphärische Luft	0,238
Stickstoff	0,244	Kohlensäure	0,248
Wasserstoff	3,405	Wasserdampf	0,475
Chlor	0,121	Ätherdampf	0,481

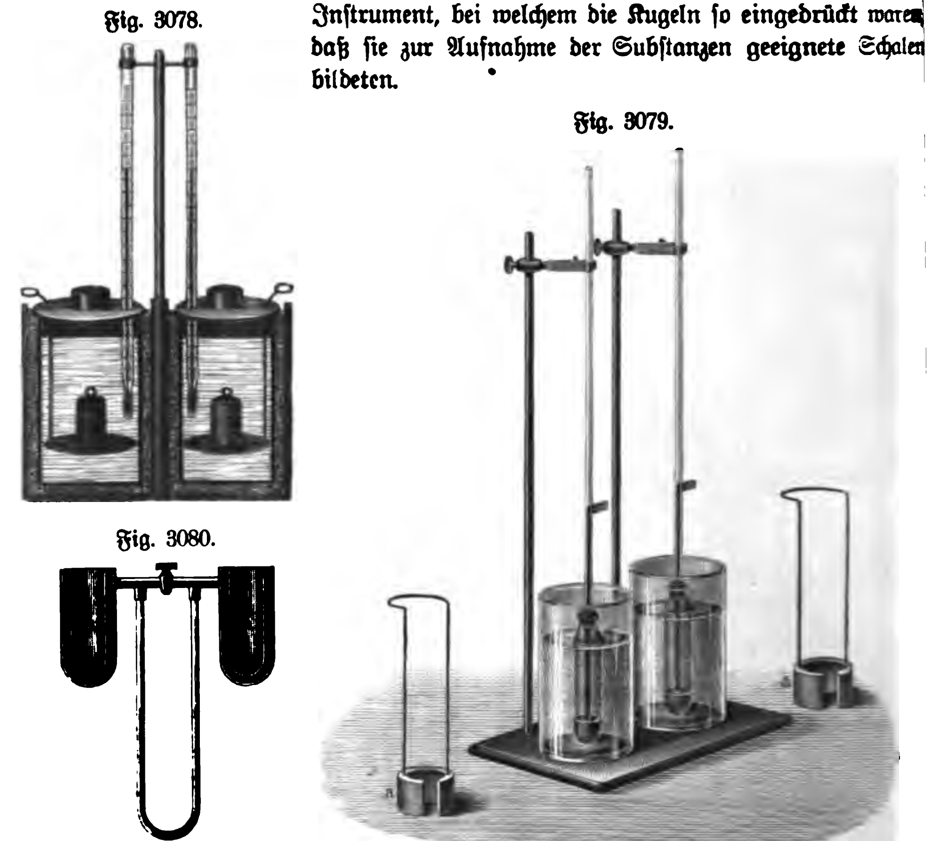
Zur direkten Bestimmung der spezifischen Wärme bei konstantem Volumen könnte man eine mit dem komprimierten Gase gefüllte Stahlflasche stark abkühlen und sodann in ein mit warmem Wasser gefülltes Kalorimeter bringen. Die Resultate sind aber so ungenau, daß der Versuch nicht zu empfehlen ist.

456. Doppelkalorimeter. Ein Doppelkalorimeter (Fig. 3078) zur raschen Vergleichung der spezifischen Wärme zweier fester Körper wird von Stöhrer in Leipzig konstruiert (S, 24). Es eignet sich namentlich zur Demonstration der Gleichheit der

Atomwärmen, wenn die Gewichte der Metallstücke im Verhältnis der Atomgewichte stehen. (Fig. 3079 Lb, 33).

d'Arsonval verwendet speziell für physiologische Zwecke eine Art großes Differentialthermometer mit eingestülpten Kugeln resp. doppelwandigen Bechern als Kalorimeter. Die beiden Gefäße sind durch eine mit Hahn versehene Röhre miteinander verbunden, um zu Anfang die Flüssigkeit in den Manometerschenkeln auf gleiches Niveau bringen zu können (Fig. 3080).

Fig. 2852 (S. 1054) zeigt ein zu gleichem Zwecke bestimmtes Differentialthermometer nach Schumann. Schon früher benutzte Ribout[1]) ein ähnliches Instrument, bei welchem die Kugeln so eingedrückt waren, daß sie zur Aufnahme der Substanzen geeignete Schalen bildeten.


Fig. 3078.
Fig. 3079.
Fig. 3080.

Hofmann benutzt zwei möglichst gleiche U-förmig gebogene Quecksilberthermometer, welche auf Stativen vor Milchglasskalen befestigt sind, so daß man, wenn letztere von hinten beleuchtet werden, deutlich auch aus der Entfernung den Stand des Quecksilbers beurteilen kann. Die Gefäße der Thermometer sind hohlcylindrisch, 15 bis 16 cm hoch und von 3,5 cm äußerem und 2,5 cm innerem Durchmesser. Der Hohlraum der Cylinder bildet selbst ein enges tiefes Gefäß, in welches die zu untersuchenden Substanzen eingebracht werden können. Um allen Wärmeverlust zu vermeiden, lassen sich die Hohlräume durch aufgesetzte Deckel aus Glas gegen die äußere Luft abschließen. Die zu untersuchenden Körper (Blei und Zink) stehen in Form von Hohlcylindern zu Gebote, die gerade in die Hohlräume einpassen. Da-

[1]) Ribout, Phil. Mag. (5) 9, 439, 1880.

mit das Glas nicht beschädigt werde, sind dieselben in Flanellhüllen eingenäht und der Boden der Hohlräume mit dicken Lagen von Baumwolle bedeckt. Das Erhitzen der Metallcylinder geschieht in Glasröhren, welche nebeneinander in einem auf 150 bis 175° erwärmten Paraffinbade stehen. Dieselben werden an seidenen Schnüren gefaßt und rasch in die Höhlungen der Thermometer eingebracht. Dadurch, daß man zunächst in beide Thermometer je einen Blei- oder Zinkcylinder einbringt, zeigt man den übereinstimmenden Gang beider Thermometer. Nimmt man nun gleich schwere Cylinder aus dem einen und anderen Metall, so zeigt sich der Unterschied der spezifischen Wärmen. Nimmt man endlich Hohlcylinder, deren Gewichte im Verhältnis der Atomgewichte stehen, so läßt sich die Gleichheit der Atomwärmen zeigen.

Looser (Z. 8, 296, 1895) benutzt das Doppelthermoskop (S. 1054). „Zwei gleich schwere, an dünnen Drähten befestigte Körper (Kupfer und Blei) mit gleicher Oberfläche werden in einen zur Hälfte mit siedendem Wasser gefüllten Kochkolben gebracht, so daß die Metalle ganz von Wasser bedeckt sind. Man läßt so lange sieden, bis man annehmen darf, daß beide Stücke dieselbe Temperatur haben. Ein Streifen Filtrierpapier (Fidibus) nimmt beim Herausheben die adhärierenden Tropfen ab und verhindert gleichzeitig Schwankungen beim Einführen in die bis zum Teilstrich 20 mit Wasser von Zimmertemperatur gefüllten Kapseln. Nach dem Einsenken biegt man den Draht herunter und setzt ein am besten mit Filz umkleidetes Deckglas über. Die Ausschläge zeigen fast genau das Verhältnis der spezifischen Wärmen (1:3).“ Man wiederholt dann den Versuch mit Kupfer und Eisen, sowie mit Kupfer und Zinn.

Taucht man zwei gleiche und gleich erhitzte Kupferstücke in Wasser und Alkohol, so zeigt der größere Ausschlag bei Alkohol dessen geringere spezifische Wärme.

Daß die Atomwärmen der Elemente (Dulong-Petit) gleich sind, weist man durch zwei im Verhältnis der Atomgewichte stehende Metallkörper (Cu und Pb) in ähnlicher Weise nach. Verfährt man genau wie oben, so erhält man fast [1]) gleiche Ausschläge.

457. Kalorimetrische Pyrometer. Zur Demonstration kann irgend ein Metallstück (mit Öse zum Fassen mit einem Haken) dienen, welches man in das Feuer einlegt und dann, wenn es die Temperatur angenommen hat, in ein Gefäß mit Wasser (Kalorimeter) einbringt. Die Temperaturerhöhung des Wassers gibt ein Maß für die Temperatur im Feuer [2]). (Fig. 3082 K, 110 und 3083 K, 120.)

Beispielsweise wurde ein Eisenklotz von 0,822 kg Gewicht benutzt. Setzt man die spezifische Wärme (mit Rücksicht auf die Umwandlungswärme) = 0,16 und nennt die Temperatur x, so ergibt sich, da beim Einbringen in 3 Liter Wasser von 11° die Temperatur auf 47° stieg:

$$3(47 - 11) = 0{,}822 . 0{,}16 (x - 47) \text{ oder } x = 867^\circ.$$

Nach gleichem Prinzip können auch sehr niedrige Temperaturen bestimmt werden.

[1]) Das käufliche Blei ist meist unrein. Die Berechnung betreffs gleicher Oberfläche steht noch aus. — [2]) Kalorimetrische Pyrometer (Wasserpyrometer) liefert Dr. Hermann Rohrbeck, Berlin NW., Karlstr. 20a, zu 40 bis 100 Mk. Ein Wasserpyrometer nach Fischer einschließlich Platincylinder (Fig. 3081) liefert Muencke in Berlin zu 95 Mk., ein einfacheres mit Nickelcylinder zu 44 Mk. Eisen ist nicht geeignet, da es in höherer Temperatur in eine andere Modifikation übergeht, wobei Wärme latent wird, auch ist die spezifische Wärme des Eisens bei höherer Temperatur wesentlich größer, etwa 0,2. S. Hartley, Beibl. 21, 853, 1897.

Fig. 3082.

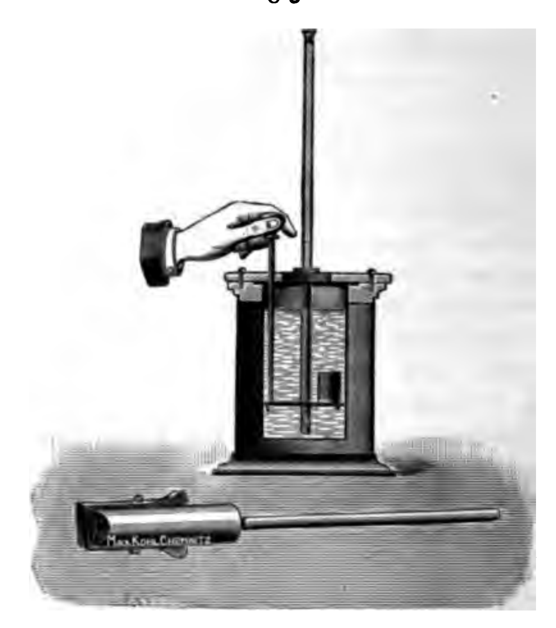


Fig. 3081.

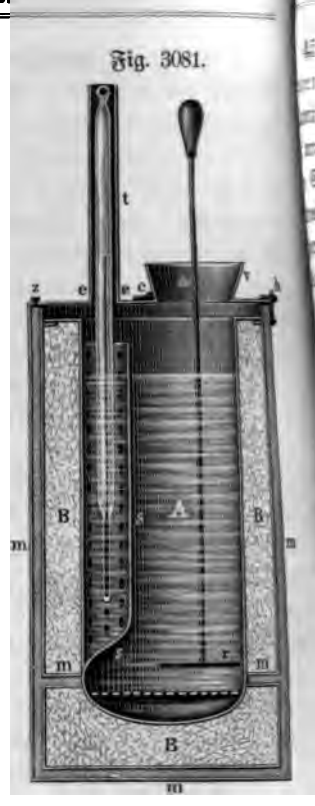
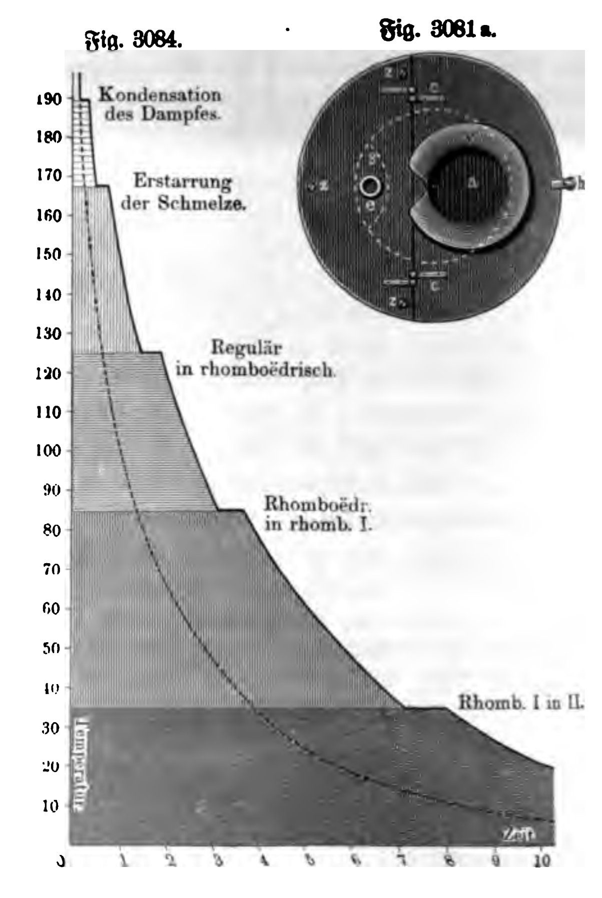


Fig. 3083.



Fig. 3084.

Fig. 3081 a.



458. Die Umwandlungswärme. Daß bei jeder Umwandlung des salpetersauren Ammoniaks Wärme frei wird, läßt sich erkennen, wenn man eine kleine Quantität des Salzes in einem Reagenzglas, in welches ein Thermometer eingesteckt ist, im Paraffinbade schmilzt, während des Abkühlens in gleichmäßigen Intervallen den Stand des Thermometers notiert und die Resultate graphisch darstellt. Die Kurve zeigt den Umwandlungspunkten entsprechende Einknickungen (Fig. 3084 schematisch. Ein weiterer Knick liegt unter 0°). Bei Eisen zeigt sich im Fall der Unterkühlung unter die Umwandlungstemperatur die sogenannte Rekaleszenz (Wiederaufglühen). Warburg (Z. 14, 177, 1901) demonstriert dieselbe an einem 3,8 mm dicken 300 mm langen Stahldraht, welcher elektrisch zum hellen Glühen erhitzt und sodann der Abkühlung überlassen wird.

459. Schmelzwärme des Eises. Die Konstanz der Schmelztemperatur bei fortgesetzter Erwärmung kann man einfach mittels eines Projektions- oder sonstigen Demonstrationsthermometers zeigen.

Zur Messung der Schmelzwärme wiegt man in ein tariertes Glasgefäß 1 kg gestoßenes Eis oder besser Schnee, gießt sodann 1 kg Wasser von 80° C. rasch hinzu und rührt es um; man erhält 2 kg Wasser von 0°. Zur Schmelzung von 1 kg Eis werden also 80 Kal. (genauer 80,1 Warburgsche Kal.) erfordert. Soll der Versuch einigermaßen zutreffen, so muß auch die Temperatur des Zimmers 0°, oder nicht viel von 0° verschieden, sein. Besser ist es, man nimmt 2 bis 3 kg Wasser von etwa 40 bis 30° Wärme, weil dieses beim Umgießen weniger Wärme verliert. Wenn hierbei die Temperatur des Gemenges auch etwas über 0° bleibt, die Rechnung, wodurch man doch die Quantität der latent gewordenen Wärme bestimmen kann, ist ja einfach. Im Sommer wird aber der Versuch immer nur schlechte Resultate geben, des im gestoßenen Eise befindlichen Wassers wegen. Es ist zweckmäßig, im Sommer die Temperatur des Wassers so zu wählen, daß das Gemenge nachher die ungefähre Temperatur des Zimmers habe. Wenn aber auch die Zahlen bei diesem Versuche schlecht zutreffen, so ist er doch immer geeignet, das so wichtige Gesetz des Latentwerdens der Wärme anschaulich zu machen.

Kleiber (Z. 16, 278, 1903) setzt, um die Verschiedenheit der Schmelzwärmen von Eis und Paraffin zu zeigen, zwei gleicherweise erwärmte eiserne Kilogrammstücke oder mit heißem Wasser gefüllte dünne Hohlcylinder zu gleicher Zeit auf einen Eis- bezw. Paraffinblock. Die Einschmelztiefen sind nicht viel verschieden, die Temperatur des in Paraffin einschmelzenden Körpers sinkt aber nur etwa halb soviel wie die des anderen, somit ist die Schmelzwärme des Paraffins nur die Hälfte der des Eises.

Letztere kann man auch direkt bestimmen, indem man das Schmelzwasser mit einem zuvor tarierten Schwämmchen aufsaugt.

Looser (Z. 8, 298, 1895) demonstriert die Schmelzwärme mittels des Doppelthermoskops, indem er doppelwandige Kapseln verwendet, bei welchen der Zwischenraum zwischen den Wänden mit Wallrat bezw. Wachs ausgegossen ist. Setzt man beide in Wasser von etwa 60°, so bleibt das mit Wallrat überzogene Thermoskop bedeutend hinter dem andern zurück, obschon die spezifische Wärme für beide Stoffe nahezu gleich ist, weil Wallrat bei dieser Temperatur schmilzt, Wachs dagegen nicht.

Folgendes sind die Werte der latenten Schmelzwärme für einige Körper:

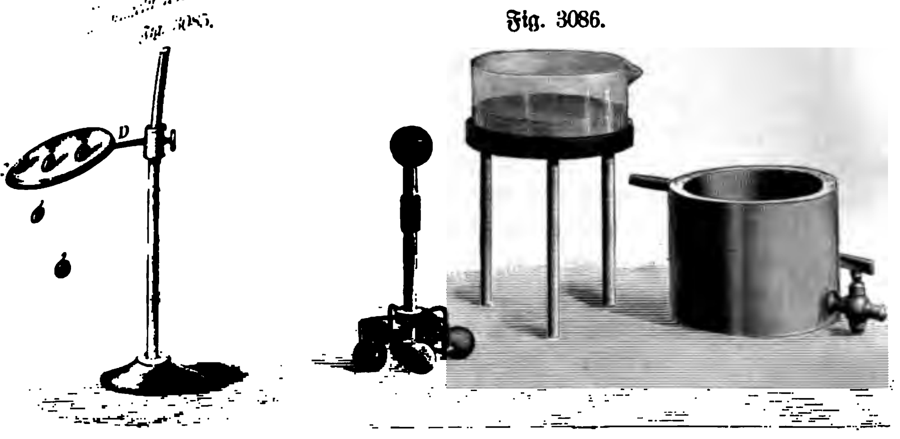
…l . . . .
Zinn . . . .
Zink . . . .

…e Zimmerkühlung durch Eis, das Sch…
Fig. … …urerhöhung bei Schneefall und ähnliches.

…kannt ist der Tyndallsche Versuch, gleich schwer… …sind, gleichzeitig auf eine horizontal stehende, gleich… …Paraffinplatte aufzubringen, wobei dieselben entsprechend mehr oder minder tief ein= oder geradezu durchschmelzen…

…796) empfiehlt leicht schmelzbare Metalle an Stelle von … …Reinhold hat einen praktischen Haken ersonnen, um bequem … …sämtlich gleichzeitig aufbringen zu können. (Fig. 3086 E, 21.)

Fig. 3085. Fig. 3086.



Schöntjes (Z 14, 31, 1901) verwendet cylindrische Körper, welche an langen geraden Stielen befestigt sind und vertikal verschiebbar von einem passenden Stativ gehalten werden (Fig. 3087 a, b, 3088 I. b, 65). Sie werden nach der Erwärmung auf eine hochkantstehende rechteckige Paraffinplatte aufgesetzt und schmelzen im Verhältnis ihrer spezifischen Wärme bis zu verschiedener Tiefe ein.

Auf den Gasbrenner A (Fig. 3087 a) stellt man das Blechgefäß C und füllt letzteres bis etwa 3 cm unter den Rand mit Wasser. Dann hängt man den Rahmen FF mit den vier gleich großen Metallcylindern aus Eisen, Messing, Zinn und Blei hinein. Die vier die Cylinder tragenden Stangen haben Einschnitte, in welche der Schieber GH eingreift; dadurch werden die Cylinder am Herunterfallen gehindert. Nachdem das Wasser einige Zeit gekocht hat, hebt man den Rahmen an den Handgriffen FF ab und schiebt ihn in die Hülsen EE (Fig. 3087 b). Durch einen seitlichen Druck auf den Knopf J fallen die vier Cylinder gleichzeitig auf den zwischen den Klemmen D senkrecht stehenden Paraffinkuchen. Fig. 3088 stellt die zum Umgießen des Paraffins bestimmte Wanne dar.

Kleiber (a. a. O.) hält für zweckmäßiger, statt der Paraffinscheibe einen Kunsteisblock zu nehmen, welcher mit den Enden auf Holzklötzen steht. Er empfiehlt ferner,

) Die Methode leidet an wesentlichen Mängeln, insofern dabei die verschiedene Wärmeleitungsfähigkeit und anderes nicht berücksichtigt ist.

't einer gut sichtbaren Teilung zu versehen und an den Stellen,
' sollen, das Eis mit einer heißen Stricknadel senkrecht zu
'luß des Schmelzwassers zu erleichtern. Zur Bestimmung



…a. Fig. 3089.

Fig. 3088.

Fig. 3090.

Fig. 3087 b.

Phosphor	5,0	Blei	5,4
Schwefel	9,4	Zinn	14,2
Salpetersaures Kali	47,4	Zink	28,1

Zu erwähnen wären hier ferner die Zimmerkühlung durch Eis, das Schneeschmelzen im Frühjahr, die Temperaturerhöhung bei Schneefall und ähnliches.

460. Eiskalorimeter. Bekannt ist der Tyndallsche Versuch, gleich schwere Kugeln, die gleich stark erhitzt sind, gleichzeitig auf eine horizontal stehende, gleichmäßig dicke Wachs- oder Paraffinplatte aufzubringen, wobei dieselben entsprechend ihrer spezifischen Wärme mehr oder minder tief ein- oder geradezu durchschmelzen[1]) (Fig. 3085).

Benthan (1796) empfiehlt leicht schmelzbare Metalle an Stelle von Wachs u. s. w. Weinhold hat einen praktischen Haken ersonnen, um bequem alle Kugeln wirklich gleichzeitig aufbringen zu können. (Fig. 3086 E, 21.)

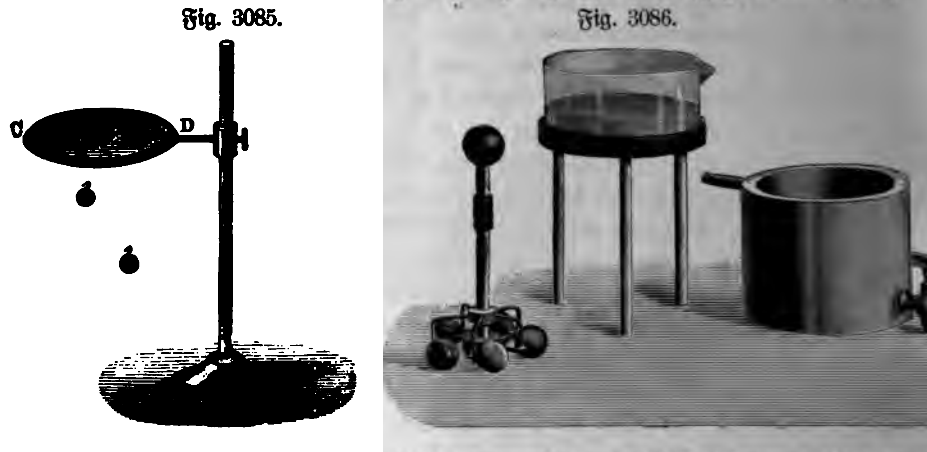


Fig. 3085. Fig. 3086.

Schöntjes (Z 14, 31, 1901) verwendet cylindrische Körper, welche an langen geraden Stielen befestigt sind und vertikal verschiebbar von einem passenden Stativ gehalten werden (Fig. 3087 a, b, 3088 Lb, 65). Sie werden nach der Erwärmung auf eine hochkantstehende rechteckige Paraffinplatte aufgesetzt und schmelzen im Verhältnis ihrer spezifischen Wärme bis zu verschiedener Tiefe ein.

Auf den Gasbrenner *A* (Fig. 3087 a) stellt man das Blechgefäß *C* und füllt letzteres bis etwa 3 cm unter den Rand mit Wasser. Dann hängt man den Rahmen *FF* mit den vier gleich großen Metallcylindern aus Eisen, Messing, Zinn und Blei hinein. Die vier die Cylinder tragenden Stangen haben Einschnitte, in welche der Schieber *GH* eingreift; dadurch werden die Cylinder am Herunterfallen gehindert. Nachdem das Wasser einige Zeit gekocht hat, hebt man den Rahmen an den Handgriffen *FF* ab und schiebt ihn in die Hülsen *EE* (Fig. 3087 b). Durch einen seitlichen Druck auf den Knopf *J* fallen die vier Cylinder gleichzeitig auf den zwischen den Klemmen *D* senkrecht stehenden Paraffinkuchen. Fig. 3088 stellt die zum Umgießen des Paraffins bestimmte Wanne dar.

Kleiber (a. a. O.) hält für zweckmäßiger, statt der Paraffinscheibe einen Kunsteisblock zu nehmen, welcher mit den Enden auf Holzklötzen steht. Er empfiehlt ferner,

[1]) Die Methode leidet an wesentlichen Mängeln, insofern dabei die verschiedene Wärmeleitungsfähigkeit und anderes nicht berücksichtigt ist.

ie Metallcylinder mit einer gut sichtbaren Teilung zu versehen und an den Stellen, vo die Cylinder wirken sollen, das Eis mit einer heißen Stricknadel senkrecht zu urchbohren, um den Abfluß des Schmelzwassers zu erleichtern. Zur Bestimmung



Fig. 3087 a.

Fig. 3089.

Fig. 3088.

Fig. 3087 b.

Fig. 3090.

der spezifischen Wärme von Flüssigkeiten verwendet er gleich große Hohlcylinder aus Messingblech mit gleichen Gewichtsmengen verschiedener Flüssigkeit gefüllt.

Das Eiskalorimeter von Lavoisier und Laplace (Fig. 3089 E, 54) wird nur noch als Demonstrationsapparat gebraucht.

Fig. 3091.

Fig. 3092.

$\frac{1}{4}$

Man kann das Eisschmelzverfahren z. B. benutzen, um die spezifische Wärme von Luft zu bestimmen, indem man längere Zeit aus einem großen Gasometer Luft durch ein mit Eisstücken gefülltes, mit Wärmeschutzmasse umgebenes Blechgefäß strömen läßt. Die Resultate werden indes nicht genau und der Versuch nimmt viel Zeit in Anspruch.

Ferner kann man im Eiskalorimeter leicht Erstarrungswärme oder falls der Schmelzpunkt unter 0° liegt, auch Schmelzwärmen verschiedener Stoffe bestimmen, vorausgesetzt, daß die spezifische Wärme des festen bezw. flüssigen Körpers bekannt ist.

Zu Messungen im Laboratorium dient das Bunsensche Eiskalorimeter (Fig. 3090 Lb, 40). Reichert hat demselben eine Form gegeben, in welcher es auch bei Vorlesungen zur Anwendung kommen kann. Wie aus der Fig. 3091 zu ersehen, besteht dasselbe aus dem Reagenzglas *B*, welches in das Gefäß *A* eingeschmolzen ist, und der sich daran ansetzenden Thermometerröhre *CG*, von welcher sich seitlich das eigentliche Meßrohr abzweigt.

Bei *G* endigt das Rohr in ein Gefäß und kann dort durch einen eingesteckten, gut eingeschliffenen Glasstöpsel geschlossen werden. Um das Instrument zu gebrauchen, wird *A* zunächst mit ausgekochtem Wasser und der nötigen Menge Quecksilber beschickt und alsdann um *B* ein Eiscylinder gebildet. Um letzteren zu erzeugen, leitet man entweder nach Bunsen Alkohol, welcher in einer Kältemischung stark abgekühlt wurde, durch das Reagenzgläschen *B*, oder man stellt nach Reichert den ganzen Apparat in eine Kältemischung, bis sich Eis zu bilden beginnt, was an dem Steigen des Quecksilbers in der Meßröhre zu erkennen ist. Alsbald nimmt man nun das Instrument aus der Kältemischung heraus und gibt neue Kältemischung in das Probierröhrchen *B*. Der Eiscylinder bildet sich nun rasch, etwa in einer Viertelstunde. Nunmehr wird die Kältemischung aus *B* wieder entfernt, der Apparat in reinem eiskaltem Wasser abgewaschen und sodann in Schnee verpackt. Auf den Boden von *B* wird ein Pfropf aus Baumwolle geschoben.

Da das Volumen von 1 g Eis 1,0908 ccm beträgt, das von 1 g Wasser dagegen 1,0001 ccm, so entspricht einer Kontraktion um 1 ccm das Schmelzen einer Eismenge von 1/0,0907 = 11,03 g.

Um nun den Wärmewert eines Grades der Skala zu finden, sperrt man das Gefäß G mittels des Glasstöpsels von der Röhre ab, bringt in B mittels einer Pipette 10 g Wasser von bekannter Temperatur nnd notiert die Einstellung des Quecksilbers. Hierauf entfernt man das kalt gewordene Wasser wieder und ersetzt es durch weitere 10 g von warmem Wasser u. s. f., bis man ein genügendes Stück der Skala bestimmt hat. Das zuletzt eingebrachte Wasser wird nicht wieder entfernt, da es dazu dienen soll, den Übergang der Wärme aus dem zu untersuchenden Körper an die Gefäßwände zu vermitteln. Bei einer solchen Bestimmung wurden nacheinander je 10 g Wasser von bezw. 10,5°, 10,7°, 10,8° in B eingebracht und dadurch Sinken der Quecksilbersäule um resp. 36,0, 36,5, 37,0 Skalenteile bewirkt. Somit war der Wert eines Skalenteiles in Grammkalorien:

$$\frac{10 . 10{,}5}{36} = 2{,}917, \quad \frac{10 . 10{,}7}{36{,}5} = 2{,}931, \quad \frac{10 . 10{,}8}{37} = 2{,}919, \text{ im Mittel } = 2{,}922.$$

Hierauf wurde dreimal hintereinander ein auf 99,3° erwärmtes, 4,389 g schweres Zinkstück in B eingeworfen, wodurch Sinken des Quecksilbers um resp. 14,0, 13,9, 14,2 Skalenteile bewirkt wurde. Daraus ergeben sich in diesen drei Fällen folgende Werte der spezifischen Wärme des Zinks: 0,0938, 0,0932, 0,0952, im Mittel: 0,0941. Zum Erwärmen der Körper bedient sich Reichert des in Fig. 3092 dargestellten kleinen Apparates. Durch das weitere äußere Glasrohr wird vermittelst der beiden Ansatzröhren Dampf durchgeleitet. In der inneren Röhre, deren unteres Ende in die Öffnung des Probierröhrchens B leicht eingeschoben werden kann, hängt der Körper an einem Kokonfaden, welcher mittels des oben aufgesetzten Korkes festgeklemmt ist. Kann man annehmen, daß die Temperatur konstant geworden ist, so bringt man den Erhitzungsapparat rasch über das Kalorimeter und lüftet den Kork, so daß der Seidenfaden frei wird und der Körper in das Probierröhrchen B hineinfällt [1]).

461. Eispyrometer. Ebenso wie ein Mischkalorimeter zur Temperaturbestimmung verwendet werden kann, läßt sich auch ein Eiskalorimeter hierzu verwenden. Zur Demonstration benutze ich einen 0,822 kg schweren Eisenklotz, welcher mittels eines Hakens in den Ofen gelegt werden kann. Das gestoßene Eis wird auf einen großen Glastrichter mit einem Filter aus Drahtnetz gebracht, damit das Schmelzwasser möglichst gut abtropft, alsdann rasch in ein dünnwandiges Blechgefäß umgefüllt, der im Ofen glühend gemachte Eisenklotz hineingebracht und alsdann alles zusammen auf den Trichter gegeben. Ein untergesetzter Maßcylinder läßt ohne weiteres die Menge des gebildeten Schmelzwassers erkennen.

Beispielsweise ergaben sich 1,55 kg Schmelzwasser. Die Temperatur x bestimmt sich aus der Gleichung:

$$0{,}822 . 0{,}16 . x = 1{,}55 . 80 \qquad x = 887^{\circ}.$$

462. Umwandlungswärme flüssiger Kristalle. Ebenso wie beim Schmelzen, findet auch bei Umwandlung kristallinischer Flüssigkeiten in die isotrop flüssige Modifikation Wärmebindung statt, umgekehrt wird dieselbe Wärmemenge frei bei der Rückumwandlung wie beim Erstarren. Sie kann aber nicht als Schmelz- oder Erstarrungswärme bezeichnet werden, weil der Aggregatzustand unverändert flüssig bleibt.

[1]) Der Apparat ist zu beziehen von E. Leybolds Nachf. in Köln zu 14 Mk.

463. Lösungswärme und Kristallisationswärme. Um die Absorption resp. Bildung von Wärme beim Lösen fester Körper in Flüssigkeiten zu zeigen, löst man Salmiak, salpetersaures Ammoniak oder Rhodankalium unter Umrühren in Wasser auf und beobachtet den Gang der Temperatur mittels des Guerickeschen Luftthermoskops. In Fällen, wobei die Temperaturänderung nur gering ist, eignet sich Karstens Aneroidthermoskop. (Vgl. S. 1043 und Fig. 2827, 2828.)

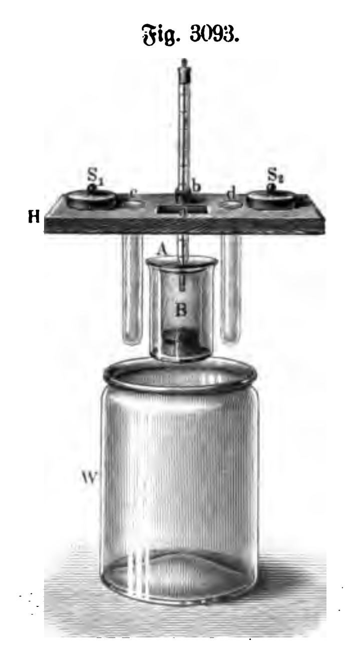
Man muß hier wieder hinweisen auf den Unterschied zwischen physikalischer und chemischer Lösung. Mischt man z. B. Wasser und Schwefelsäure, so zeigt sich eine bedeutende Erwärmung statt Abkühlung, weil Hydratbildung, d. h. chemische Verbindung erfolgt.

Man benutzt hier zweckmäßig das kleine Stöhrersche Projektionsthermometer (S. 1071, Fig. 2892), welches man in ein kleines, nahezu ganz mit Wasser gefülltes, Reagenzgläschen eintauchen läßt. Setzt man Schwefelsäure zu, so sieht man das Thermometer rasch steigen. Zusatz von salpersaurem Ammoniak bewirkt umgekehrt Temperaturerniedrigung.

Ridout (1880) bedient sich eines Differentialthermometers, dessen Kugeln durch becherartige Gefäße mit hohler Wandung ersetzt sind. (Vgl. Fig. 3080, S. 1166.) Der Hohlraum zwischen den Wänden vertritt die Stelle der Kugeln. In eines der Gefäße bringt man Wasser und, nachdem Temperaturgleichgewicht eingetreten ist, den aufzulösenden Körper. Die beiden Schenkel des Differentialthermometers müssen oben dicht unter den Gefäßen durch einen Hahn verbunden sein, um zunächst, bis die Temperatur konstant und überall dieselbe geworden, Verbindung untereinander oder mit der äußeren Atmosphäre herstellen zu können.

Eine Nutzanwendung der Kristallisationswärme ist die Natronsalzheizung, wobei ein Gemenge von 1 Volum essigsaurem Natrium und 10 Volum unterschwefligsaurem Natrium angewendet wird.

Fig. 3093.



464. Reaktionswärme. Ein bequemer Apparat zur Messung der chemischen Reaktionswärme nach E. Wiedemann ist dargestellt in Fig. 3093 (Lb, 40). Die beiden Flüssigkeiten sind anfänglich in den Reagenzgläschen *c* und *d* enthalten und werden dann in dem Becherglas *b* gemischt (z. B. Normalsalzsäure und Normalnatronlauge).

Bei der großen Verdünnung der angewandten Lösungen kann die spezifische Wärme des Gemisches gleich 1 gesetzt werden, so daß die Temperaturerhöhung multipliziert mit der Menge der Flüssigkeit direkt die Neutralisationswärme ergibt.

Man versteht darunter die bei Verbindung äquivalenter Mengen von Säure und Basis auftretende Wärmemenge. Mischt man beispielsweise 1 Liter Wasser, welches 1 Grammmolekül, d. h. 1 + 35,45 g Salzsäure (HCl) enthält, mit 1 Liter Wasser, in welchem 1 Grammmolekül Ätznatron, d. h. 23,05 + 1 + 16 g Ätznatron (NaHO) gelöst sind, und war die anfängliche Temperatur 13,87°, die Temperatur nach der Mischung 20,02°,

also die Temperaturerhöhung der 2 kg Flüssigkeit = 6,85°, so ist die entwickelte Wärmemenge, da die spezifische Wärme = 1 gesetzt werden kann, = 2 . 6,85 = 13,7 (große) Kalorien = 13 700 kleine Kalorien. Dies ist die Neutralisationswärme von Salzsäure und Ätznatron.

Für genauere Versuche verwendet man als Kalorimeter zweckmäßig eine Dewarsche Flasche, wie sie zur Aufbewahrung flüssiger Luft gebraucht wird, um Wärmeaustausch nach der Umgebung möglichst auszuschließen. Die Wassermenge muß möglichst groß, das Thermometer also sehr empfindlich sein. Am besten wird ein solches nach Beckmann (vgl. S. 1069, Fig. 2884) benutzt. Das Ergebnis der Messung wird durch eine sogenannte thermochemische Gleichung dargestellt:

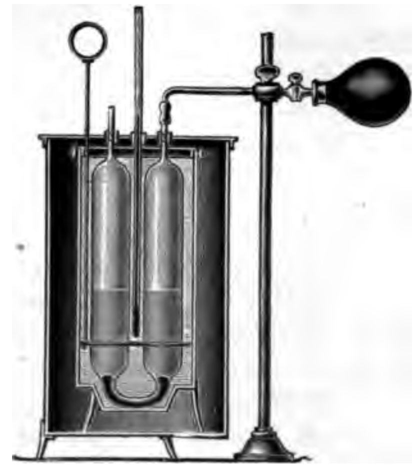
$$HCl,\ aq + NaHO,\ aq = NaCl,\ aq + H_2O + 13,7,$$

wobei der Zusatz aq bedeutet, daß die Substanzen in Wasser gelöst sind. Würde Abkühlung eintreten, so müßte —13,7 geschrieben werden.

Der Umstand, daß die Neutralisationswärmen sehr verdünnter Lösungen alle gleich gefunden werden, weist darauf hin, daß dieselbe in Wirklichkeit nur der Vereinigung von H mit HO entspricht, während z. B. in obigem Fall Na und Cl sich nicht vereinigen, sondern getrennt (dissoziiert) bleiben, ebenso wie schon in der Salzsäurelösung H und Cl getrennt waren und in der Natronlauge Na und HO.

Ähnlich erfolgt die Messung der Hydratationswärme, z. B. beim Auflösen von 1 Grammmolekül wasserfreiem Chlorcalcium mit 6 Grammmolekülen Wasser. Man löse zunächst wasserfreies $CaCl_2$ in viel Wasser, sodann wasserhaltiges Chlorcalcium ($CaCl_2 + 6 H_2O$) in viel Wasser, wobei eine negative Wärmetönung (Lösungswärme) gefunden wird. Die Hydratationswärme ist dann die Summe der beiden Wärmemengen, da durch Lösung des entstandenen Hydrats wieder ein Teil der Hydratationswärme gebunden wird.

Fig. 3094.



Einen andern zum gleichen Zwecke dienenden Apparat zeigt Fig. 3094 (Lb, 75). In den beiden Schenkeln der U-förmigen Röhre befinden sich die beiden Reagenzien. Sie sind getrennt durch das Quecksilber in der engen Biegung. Durch wiederholtes Zusammendrücken des Kautschukballes bewirkt man die Mischung. Die Wärmetönung ergibt das Kalorimeter, in welches der Apparat eingesenkt ist.

Man kann hier insbesondere auch den Unterschied von exothermen und endothermen Reaktionen hervorheben, welch letztere nicht wie die ersteren unter Entbindung, sondern unter Verbrauch von Wärme, also unter Abkühlung stattfinden.

Looser (Z. 15, 262, 1902) demonstriert die thermochemische Differenz bei der Bildung von Eisen- und Zinksalzen mittels seines Doppelthermoskops (S. 1054), indem er Zink, bezw. Eisen in Pulverform in Kupfervitriollösung einrührt.

465. Dissoziation von Lösungen. Zum Nachweis der Jonisierung durch Verdünnung benutzt Looser dasselbe Verfahren. Es wird zunächst nach Lüpke (Elektro-

chemie 3, 84) durch Eintragen von Zinkspänen in Normallösung von Kupferchlorid und Kupfersulfat gezeigt, daß die Wärmemenge, welche entbunden wird, wenn ein Metall ein anderes aus der Lösung des Salzes verdrängt, stets dieselbe ist, welches auch das Säureradikal dieses Salzes ist. Ferner wird gezeigt, daß beim Verdünnen von konzentrierter Rohrzuckerlösung keine Temperaturänderung eintritt, wohl aber bei Salmiaklösung und ganz besonders beim Verdünnen der Lösung von Ammoniumnitrat.

466. **Umkehrbare Reaktionen.** Von besonderem Interesse sind die umkehrbaren Reaktionen, wie z. B. bei Mischungen von Bittersalz und Kochsalz oder Bittersalz und Glaubersalz. Beim Erwärmen wird Wärme verbraucht wie beim Schmelzen eines Körpers, beim Abkühlen wird sie wieder frei.

Hierauf beruht der Thermophor zum Warmhalten von Milch und von anderen Getränken und Speisen [1]).

Wird der Apparat zehn Minuten lang in kochendes Wasser gestellt, so nimmt er soviel Wärme auf, daß die beim Abkühlen frei werdende Kristallisationswärme stundenlang die Temperatur auf etwa 50° erhält.

467. **Kältemischungen.** Wenn man ungefähr 3 Tle. gestoßenes Eis, oder besser Schnee, und 1 Tl. Kochsalz miteinander mengt und das Gemenge dabei mit einem eisernen Löffel rasch durcharbeitet, so erhält man eine breiige Masse, deren Temperatur auch im Sommer auf — 10° bis — 12° sinkt; noch größere Kälte, bis — 16°, erreicht man, wenn man das Kochsalz selbst vorher in Schnee oder Eis erkaltet und das Gefäß, in welchem die Mischung vorgenommen wird, selbst mit Eis oder Schnee umgibt.

Werden 100 Tle. trockener Schnee innig gemischt mit 33 Tln. feingepulvertem Chlornatrium (Kochsalz), so sinkt die Temperatur bis 21° C.

Gleiche Gewichtsmengen Ammoniumnitrat und Kaliumnitrat in der ihrem Gesamtgewicht gleichen Wassermenge gelöst, erniedrigen die Temperatur um 22° C.

73 g Schnee mit 77 g Alkohol von 4° erkalten bis — 30°.

Mischt man 1 kg Schwefelsäure mit 1 kg Schnee, so sinkt die Temperatur bis 12° C.

Mischt man 100 Tle. Wasser mit 250 Tln. kristallisiertem Chlorcalcium, so sinkt die Temperatur bis — 12° C.

Auch durch einen Brei aus kristallisiertem Glaubersalz und käuflicher rauchender Salzsäure kann man hinreichende Temperaturerniedrigung erreichen, um Wasser in dünnen Glasröhren zum Gefrieren zu bringen.

3 Tle. salzsaurer Kalk (nicht geglüht) und 2 Tle. Schnee geben bis — 28° C.

Ältere Formen von Eismaschinen zeigen die Fig. 3095 (K, 37) und 3096 (K, 15).

Bequemer und sparsamer ist der Gebrauch von Meidingers Eismaschine [2]). Sie besteht aus einem cylindrischen Blechgefäß *BB*, welches man mit zerkleinertem Eis und Salzlösung füllt, dem Sieb *CC*, welches Salz enthält und dem Becher *A* zur Aufnahme der zu kühlenden Flüssigkeit. In dem Maße als sich die Kochsalz-

[1]) Zu beziehen von der deutschen Thermophor-Akt.-Gesellschaft in Berlin SW., Kommandantenstr. 14, zu 8 bis 20 Mk. — [2]) Siehe Badische Gewerbezeitung 1872, fünfte Beilage, S. 37. Sie ist zu beziehen von Beuttenmüller u. Co. in Bretten zu 6 bis 15 Mk.

lösung in *BB* durch Verflüssigung des Eises verdünnt und deshalb an Wirksamkeit verliert, löst sich in *CC* neues Salz auf und stellt die anfängliche Konzentration wieder her.

Man braucht somit bei dieser Maschine nicht zu drehen oder schaukeln wie bei den gewöhnlichen, die Mengung von Eis und Salz erfolgt automatisch.

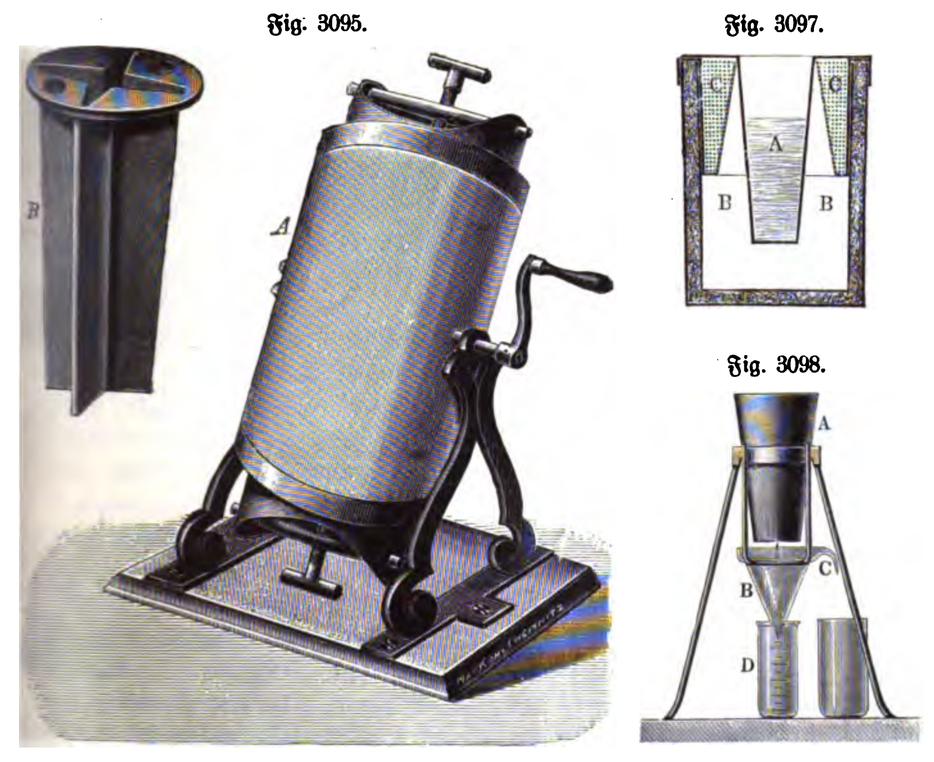


Fig. 3095. Fig. 3097. Fig. 3098.

Besonders wichtige physikalische Anwendungen der Kältemischungen sind das Trocknen von Gasen durch Abkühlung und die Feuchtigkeitsbestimmung mittels des Kondensationshygrometers. Fig. 3098 zeigt die älteste, bereits von den Florentiner Akademikern benutzte Form. Durch das aus dem Eisgefäß *A* abtropfende und bei *C* überlaufende Schmelzwasser wird der Konus *B* konstant auf 0° erhalten. Die kondensierte Feuchtigkeit sammelt sich in dem Maßcylinder *D*.


Fig. 3096.

468. Wärmeentwickelung beim Erstarren überkühlter Lösungen. Nach Böttger wird zweckmäßig das essigsaure Natron verwendet. Man füllt ein Becherglas mit der heiß gesättigten Lösung, stellt dieses auf ein Stativ, an welchem auch der Stiel des Thermoskopgefäßes befestigt wird, so daß letzteres von der Lösung umgeben ist, schichtet dann noch reines Wasser darüber und läßt erkalten. Sobald man dann einen Kristall des Salzes einwirft,

erfolgt die Kristallisation und die Temperatur steigt rapid in die Höhe. (Fig. 3099 Lb, 5.)

Hofmann zeigt die beim Festwerden freiwerdende Wärme dadurch, daß er eine dünnwandige, unten geschlossene, 3 bis 6 mm weite Metallröhre mit Äther ganz füllt, unten daran einen Kristall des genannten Salzes befestigt und den Äther oben anzündet, der mit schwacher Flamme fortbrennt; sowie die Röhre mit dem Kristall in die bereits erkaltete Salzlösung getaucht wird, kristallisiert diese und es wird auch der Äther erwärmt, der nun rasch in hoher Flamme auffflackert.

Fig. 3099.



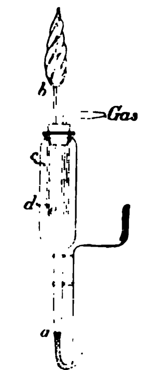
Weniger zu empfehlen ist das unterschwefligsaure Natron, da es sich beim Kochen durch Zersetzung trübt.

Man schmilzt in einem kleinen Kolben unterschwefligsaures Natron mit sehr wenig Wasser durch Erwärmen im einem Sandbade mit der Vorsicht, daß keine Stäubchen von festem Salz in dem Halse des Kolbens hängen bleiben. Hierauf bedeckt man den Kolben mit einem reinen Deckel und läßt mehrere Stunden (event. über Nacht) abkühlen. Bringt man alsdann das Gefäß des Demonstrationsthermometers in die Flüssigkeit, so schießen daran sofort Kristalle an und man sieht das Thermometer lebhaft steigen.

Besser geeignet ist Glaubersalz (2 Tle. auf 1 Tl. Wasser), doch steigt die Temperatur bei der Kristallisation nur von 15° auf 23°.

469. Das Freiwerden latenter Wärme beim Erstarren überschmolzener Körper. Man gießt nach Böttger etwa 3 cm hoch Wasser in ein sogenanntes Reagenzröhrchen, steckt ein kleines Thermometer hinein, gießt eine dünne Schicht Öl darauf und befestigt das Thermometer so, daß seine Kugel unter dem Wasser bleibt. Bringt man nun den Apparat in eine Kältemischung, so bleibt das Wasser auch unter 0° tropfbar flüssig. Ist die Erkaltung bis auf etwa — 5° fortgeschritten, so gefriert ein Teil des Wassers, wenn das Gläschen auch nur schwach gerüttelt wird, und das Thermometer steigt auf 0°.

Fig. 3100.



Zur Projektion dieser Erscheinung sind besonders die von Stöhrer gelieferten kleinen Gefrierthermometer (Fig. 3046, S. 1149) geeignet. Die Kugel ist bei denselben von einem kleinen angeschmolzenen, teilweise mit Wasser gefüllten Glasgefäßchen umgeben. Letzteres wird zunächst durch Einstellen in Eiswasser bis auf 0° abgekühlt, dann mit etwas Watte umwickelt und Äther auf dieselbe getröpfelt, während dasselbe vor der Linse des Projektionsapparates sich befindet. Es fällt dann der Quecksilberfaden des Thermometers im Bilde fortwährend und läßt sich bis auf — 6° bringen. Nimmt man vorsichtig die Watte ab, so zeigt sich das Wasser noch flüssig, erschüttert man aber die Röhre, so erstarrt dasselbe und gleichzeitig steigt das Thermometer auf 0°.

Man kann übrigens die Abkühlung auch in einer Kältemischung bewirken und dann erst das Instrumentchen rasch aber vorsichtig in den Projektionsapparat einführen und alsbald erschüttern.

Looser (Z. 8, 299, 1895) setzt in die Thermoskopkapsel, deren Einsatzgläschen etwas Wasser enthält, ein Reagenzglas mit Schwefeläther (Fig. 3100) und leitet Leuchtgas hindurch. Die Abkühlung kann man bequem verfolgen und sieht im Momente des Erstarrens das Thermoskop um 5 bis 35 mm steigen.

470. **Verdampfungswärme.** Daß die Temperatur der siedenden Flüssigkeit sich bei fortgesetzter Wärmezufuhr nicht ändert, kann man mit jedem Demonstrationsthermometer zeigen.

Zur Messung der latenten Dampfwärme wird ein durch ein Kalorimeter geführter Schlangenkühler benutzt.

Vor denselben setzt man ein Gefäß, in welchem sich das vom Dampfe aus der Leitung mitgerissene Kondensationswasser sammeln kann. Das Kalorimeter, welches ich benutze, faßt 20 Liter Wasser. Das aus der Kühlschlange austretende kondensierte Wasser fließt in einen Maßcylinder, so daß man ohne weiteres das Gewicht des Dampfes ablesen kann. Es findet sich, daß 1 kg Dampf bei der Kondensation etwa 560 Kal. abgibt, d. h. die Temperatur des Wassers entsprechend erhöht.

Beispielsweise war die Temperaturerhöhung der 20 Liter Wasser 16°, die Menge des Kondensationswassers = 570 ccm, also

$$20 . 16 = 0{,}570 . x \quad \text{und} \quad x = 560.$$

Für Alkohol würde sich die Verdampfungswärme = 214, für Schwefeläther = 90 Kalorien finden.

Eine andere Methode besteht darin, daß man den Dampf durch Eis hindurchleitet und die Schmelzwassermenge bestimmt.



Fig. 3101.

Ein Apparat, welcher zugleich das Prinzip der Wassererhitzung durch Einleiten von Dampf erläutert, ist in Fig. 3101 dargestellt. Man wiegt in den Cylinder c eine beliebige Quantität Wasser von bekannter Temperatur und bringt dann das in dem Kochgefäße a enthaltene Wasser ins Kochen, doch bevor man das Rohr b in den Cylinder taucht; dieses Kochen unterhält man so lange, bis man annehmen darf, daß alle Luft aus dem Apparate ausgetrieben sei; wäre der Apparat in $1/_5$ der wirklichen Größe abgebildet, so reichten dazu zwei bis drei Minuten aus. Man taucht hierauf das Rohr b in den Cylinder, ohne aber das Gefäß ganz vom Feuer zu nehmen und das Kochen zu unterbrechen. Der Wasserdampf verdichtet sich, und das Wasser steigt im Cylinder. Ist es etwa um $1/_{10}$ vermehrt, so zieht man das Rohr b heraus und wiegt das Wasser wieder, nachdem man seine Temperatur bestimmt hat. Bei der letzteren Arbeit muß man ein Thermometer mit sehr kleiner Kugel anwenden und nur diese eintauchen, da man durch Eintauchen des Instrumentes mit seiner Skala der geringen

Fig. 3102.

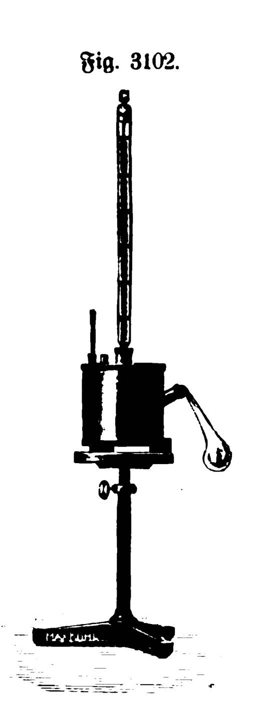
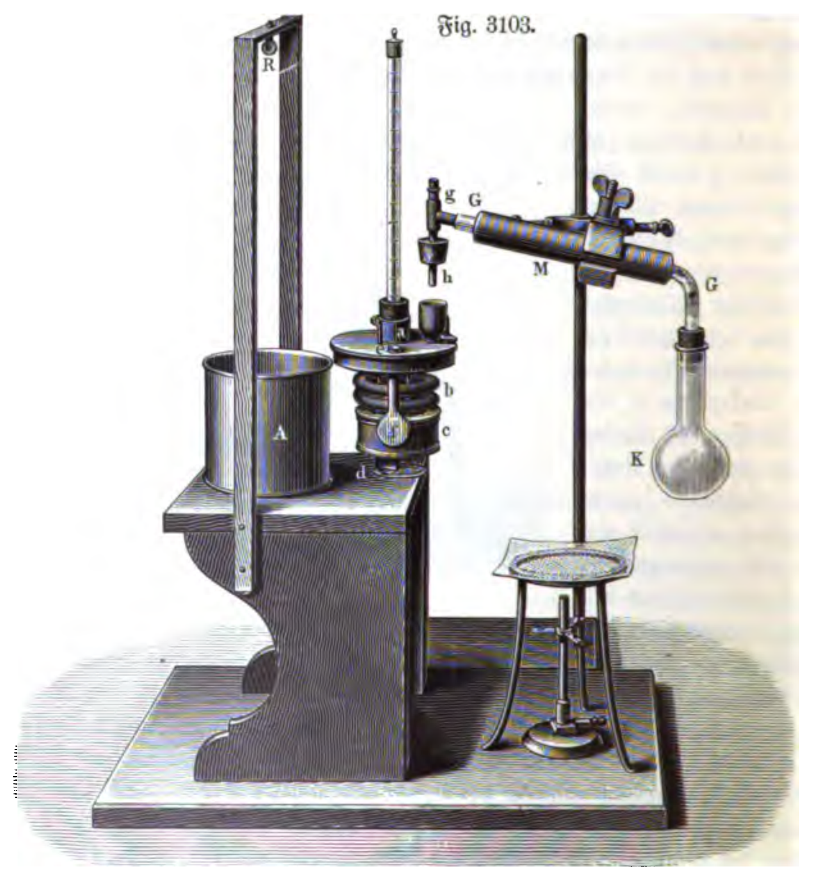


Fig. 3104.



Fig. 3103.



Wassermenge viel zu viel Wärme entziehen und dadurch einen größeren Fehler herbeiführen würde, als der ist, den man durch das Eintauchen bis zum Gipfel der Quecksilbersäule vermeiden will.

Die Rechnung ist einfach, wie folgendes Beispiel zeigt. Das Wasser wog vor dem Versuche 60 g, nachher 66,1, die Temperatur war vor dem Versuche 12° C., nachher 68,5; die 60 g Wasser wurden also um 56,5° wärmer, also um 60 . 56,5 = 3390 Wärmeeinheiten; 6,1 g Kondensationswasser wurden aber auch um 31,5° C. kälter, gaben also 31,5°. 6,1 = 192 Wärmeeinheiten an das andere Wasser ab, also rühren von der latenten Wärme nur 3198 Wärmeeinheiten her, welche 6,1 g Dampf abgegeben haben, und 1 g hat also 524 Wärmeeinheiten abgegeben. Obgleich man durch einen solchen Versuch, wegen des Verlustes an das Glas und die Luft, sowie wegen des Wassers, welches sich schon im Rohre *b* kondensiert, stets die latente Wärme des Dampfes zu klein erhält, so ist derselbe gleichwohl sehr geeignet, das Faktum an sich zeigen und auch einen annähernden Begriff von der Menge

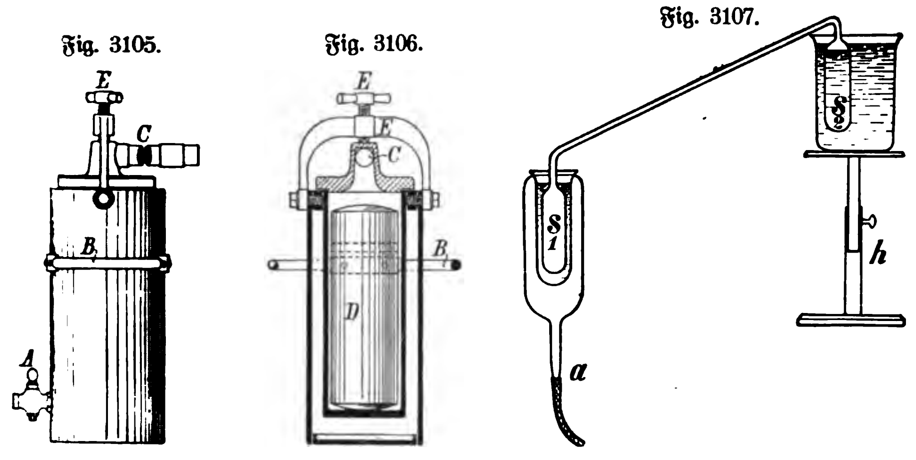


Fig. 3105. Fig. 3106. Fig. 3107.

der im Wasserdampf latenten Wärme zu geben. Verschiedene Apparate zur Bestimmung der Verdampfungswärme zeigen die Fig. 3102 K, 33; Fig. 3103 Lb, 75 und Fig. 3104 K, 55.

Eine praktische Anwendung bilden die Dampfkochapparate, welche ermöglichen, durch eingeleiteten Dampf rasch große Mengen von Wasser zum Kochen zu bringen, z. B. in Wäschereien, großen Küchen usw.

Einen Apparat, welcher umgekehrt deutlich zur Anschauung bringt, wieviel Dampf man mit einer gegebenen Wärmemenge erhalten kann, zeigt der transportable Dampfentwickler von Breuer[1]) (Fig. 3105, 3106). Bei demselben werden schmiedeeiserne Bolzen von 3 bis 25 kg Gewicht in einem gewöhnlichen Ofen hellrotglühend gemacht und sodann in Stahlblechbehälter ähnlich Kohlensäureflaschen eingeführt und ein dichtschließender Deckel aufgeschraubt. Durch einen Rohrstutzen läßt man Wasser eintropfen, aus einem anderen Stutzen entweicht der gebildete Dampf.

Looser (Z. 9, 270, 1896) demonstriert den Unterschied der Verdampfungswärmen von Äther und Alkohol mittels seines Doppelthermoskops (S. 1054). Die Flüssigkeiten werden nach Fig. 3107 in pulshammerartige, luftleer gemachte Gefäße

[1]) Breuer, Prometheus 10, 193, 1898; zu beziehen von der Fabrik transportabler Dampfentwickler Berlin W., 8.

eingefüllt und der leere Teil (s_1) in die Thermoskopkapsel, der volle Teil (s_2) in ein Becherglas mit Wasser von 50° gestellt. Die Manometer steigen nahezu gleich hoch; beim Herausheben aus der Kapsel bemerkt man indes, daß diese gleichen Wärmemengen etwa dreimal soviel Äther als Alkohol verdampft haben.

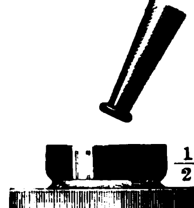
Man kann hier auch hinweisen auf die Änderung der Verdampfungswärme mit der Temperatur, insbesondere ihr Verschwinden bei der kritischen Temperatur.

471. Dampfkalorimeter. Bunsen hat (1887) analog seinem Eiskalorimeter auch ein Dampfkalorimeter konstruiert, welches jedenfalls bequemer ist, wenn auch die Bestimmungen nicht die gleiche Genauigkeit erreichen. An einem Ende eines Wagebalkens hängt an einem langen Platindrahte ein Schälchen aus Platindrahtnetz in einem Glascylinder, welcher von Wasserdampf durchströmt wird. Der Platindraht geht frei durch eine Öffnung des Cylinderdeckels hindurch und der daneben hinausdringende Dampf wird sofort durch eine geeignete Saugvorrichtung (Schornstein) weggenommen, so daß er die Wage nicht erreichen kann. Wird in das Körbchen der zu untersuchende Körper eingelegt, so veranlaßt er die Kondensation einer gewissen Menge Wasserdampf, welche leicht gewogen werden kann, da das Kondensationswasser in dem Körbchen hängen bleibt und dieses bereits an der Wage hängt. Die Verdampfungswärme dieses Wassers wurde aber verbraucht, um den Körper bis 100° zu erwärmen. Man kann also entweder die spezifische Wärme des letzteren oder die Verdampfungswärme der Flüssigkeit finden [1].

Entsprechend der Temperaturmessung mit dem kalorimetrischen Pyrometer kann auch das Dampfkalorimeter z. B. zur Bestimmung sehr niedriger Temperaturen verwendet werden, da sich an dem abgekühlten Körper um so mehr Dampf kondensiert, je niedriger die Temperatur war.

472. Kälte durch Verdunstung. Hofmann zeigt die Kälteerzeugung beim Verdunsten von Äther, indem er eine zur Hälfte mit Wasser gefüllte Probierröhre in einen mit Äther gefüllten Cylinder stellt, derart, daß die Wasseroberfläche etwas tiefer liegt, als die des Äthers. Wird nun mittels des Wassertrommelgebläses ein Luftstrom durch den Äther geleitet, so ist im Verlauf von wenigen Minuten das Wasser in der Röhre zu Eis erstarrt. Hat man den Luftstrom zu früh unterbrochen, so findet sich in dem Reagenzglas nur eine der Wand sich anschmiegende Eisröhre vor.

Fig. 3108.



Sehr gut eignet sich die mit Mousselin umwickelte Messingkugel des Karstenschen Aneroidthermoskops (vgl. S. 1043), welche man befeuchtet und dann hin- und herbewegt.

Um das Anfrieren einer mit Schwefelkohlenstoff gefüllten kleinen Metallschale auf Holz zu demonstrieren, kühlt man zweckmäßig das Holz schon vorher auf den Gefrierpunkt ab. Mittels eines Blasebalges wird der Schwefelkohlenstoff rasch zum Verdunsten gebracht (Fig. 3108).

[1] Über das Verdampfungskalorimeter von F. Neesen siehe Zeitschr. f. Instrumentenkunde 11, 197, 1891. Dasselbe ist dem Bunsenschen Eiskalorimeter nachgebildet, das Reagenzglas ist aber statt von Eis von einem Docht umgeben, der in Äther eintaucht.

Nach Weinhold kann man auch Quecksilber in einem Reagenzglas in Äther zum Gefrieren bringen, wenn man die Verdunstung durch Hindurchblasen von Luft befördert und das Eindringen äußerer Wärme durch Anwendung doppelter Glashüllen hindert. Die Dewarschen Flaschen, wie sie zum Aufbewahren flüssiger Luft gebraucht werden, dürften zu diesem Versuch besonders geeignet sein.

Zu quantitativer Bestimmung der Verdunstungswärme bestimme ich die Temperaturerniedrigung einer größeren Menge von Schwefeläther in einem Becherglase beim Durchleiten von Luft mittels einer Röhre, die in eine Art Brause endigt, so daß die Luft in vielen kleinen Bläschen durch den Äther hindurch tritt. Die Menge des Äthers wird vor und nach dem Versuch gewogen. Aus der spezifischen Wärme und der Temperaturerniedrigung ergibt sich dann der Wärmeverbrauch zur Verdunstung.

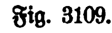
Beispielsweise sank die Temperatur von 14° auf 4°, d. h. um 10° als von 340 g Äther 20 g verdunstet waren. Ist x die Verdunstungswärme, 0,52 die spezifische Wärme des Äthers, so hat man $x . 20 = 0{,}340 . 10 . 0{,}52$ also $x = 90$ Kalorien.

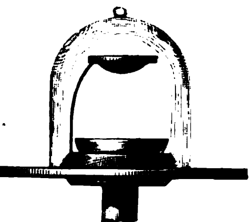
Looser (Z. 8, 299, 1895 und 9, 271, 1896) benutzt für diese Versuche das Doppelthermoskop (S. 1054).

Die beiden kegelförmigen Rezeptoren werden mit den Manometern verbunden, auf jedes ein Stück Filtrierpapier von 60 mm Durchmesser gelegt und das eine mit einigen Tropfen Spiritus und das andere mit Schwefeläther benetzt. Durch Fächeln oder Blasen mit einem Blasebalg kann die Wirkung verstärkt werden.

Zur Demonstration der Abnahme der Verdunstungsgeschwindigkeit mit dem Sättigungsgrad wird durch Überdecken mit einem Becherglase die Verdunstung gehindert. Die Abkühlung hört auf. Stellt man eine der Kapseln des Doppelthermoskops in ein mit Wasser gefülltes Glasgefäß, die andere in eine mit Wasser gefüllte Tonzelle, so sieht man die Temperatur des letzteren sich immer mehr erniedrigen.

Will man durch Verdunstung unter der Luftpumpe Wasser zum Gefrieren bringen, durch Schwefelsäure, so muß man die betreffenden Gefäße auf Korkscheiben stellen, um sie gegen Wärmezuleitung möglichst zu schützen.


Fig. 3109.



Als Schwefelsäure muß konzentrierte englische Schwefelsäure oder Vitriolöl genommen werden, und beide Gefäße, sowohl jenes mit Wasser, als jenes mit dem Vitriolöl, müssen sehr flach sein; sie werden nebeneinander gesetzt oder es wird mittels eines auf dem Brettchen befestigten Drahtringes, wie Fig. 3109, das Wasser höher gestellt.

Das Gefäß für die Schwefelsäure muß bedeutend größer sein, man nimmt überhaupt nur wenig Wasser.

Der Versuch ist nicht besonders zu empfehlen, da leicht die Luftpumpe durch die Wasserdämpfe für anderweitigen Gebrauch geschädigt wird. Besser benutzt man eine Carrésche Schwefelsäure-Eismaschine[1]), Fig. 3112 (Lb, 220 bis 580 Mk.).

[1]) Eine kleine Eismaschine nach Fleuß nach Fig. 3110 und 3111 liefern Bieberstein u. Goedicke, Hamburg, Brandstwiete 21, zu 225 Mk. Eine einmalige Füllung mit 1/2 kg Schwefelsäure reicht für 75 Gefrierprozesse. In der Anordnung Fig. 3110 dient sie zur Herstellung von Blockeis, nach Fig. 3111 zur Kühlung von Wasser, Milch, Wein, Limonade u. s. w., wozu zwei bis drei Minuten erforderlich sind, während die Herstellung von 1 und 2 Pfd. Blockeis 25 Minuten dauert.

Auch der Schwefelsäurekryophor ist geeignet das Prinzip zu demonstrieren. Übliche Formen desselben zeigen die Fig. 3113 (Lb, 4,50) und Fig. 3114 (nach Weinhold K, 4,50).

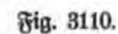


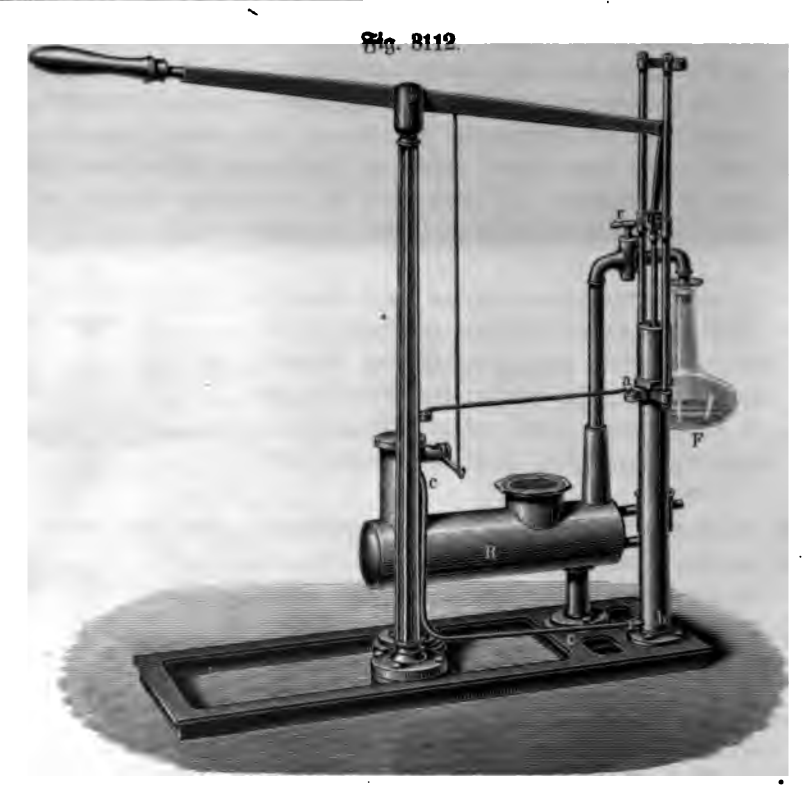
Fig. 3110.





Fig. 3111.

Fig. 3112.

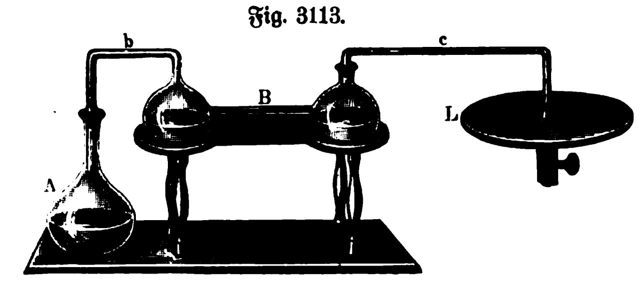


Bei ersterem ist A eine Flasche mit Wasser, B ein Gefäß mit konzentriert Schwefelsäure, welches mit der Luftpumpe L in Verbindung steht. Bei der andern

Form befindet sich das Wasser in der oberen Kugel, die Schwefelsäure in der unteren. Zum Einfüllen beider Flüssigkeiten (bei horizontaler Stellung des Apparates) dient der darunter abgebildete Trichter. Die Luft wird beseitigt, indem man das Wasser kochen läßt und dann das offene Ende durch ein Schlauchstückchen und einen keilförmigen Glasstöpsel verschließt. Der Apparat wird dann so gedreht, daß sich die Schwefelsäure in den cylindrischen Teil ausbreitet [1]).

Eine andere Form des Apparates (Fig. 3115) beschreibt Grimsehl (Z. 16, 277, 1903). Zunächst wird durch Kochen die Luft ausgetrieben, worauf das Sieden nach Abschluß des Hahnes noch längere Zeit fortdauert. Kühlt man eines der Gefäße mit kaltem Wasser, so hört dort das Sieden auf, während es im andern stürmisch erfolgt. Um das Gefrieren des Wassers zu zeigen, bringt man alles Wasser nach A, füllt den Trichter mit konzentrierter Schwefelsäure und läßt durch vorsichtiges Öffnen des Hahnes, ohne daß Luft eintreten kann, soviel nach B fließen, bis es ungefähr zu einen Drittel gefüllt ist. Schüttelt man dann den Apparat, so sinkt das Thermometer in einer halben Minute unter Null und plötzlich erfolgt Eisbildung im ganzen Gefäße A [2]).

Fig. 3113.



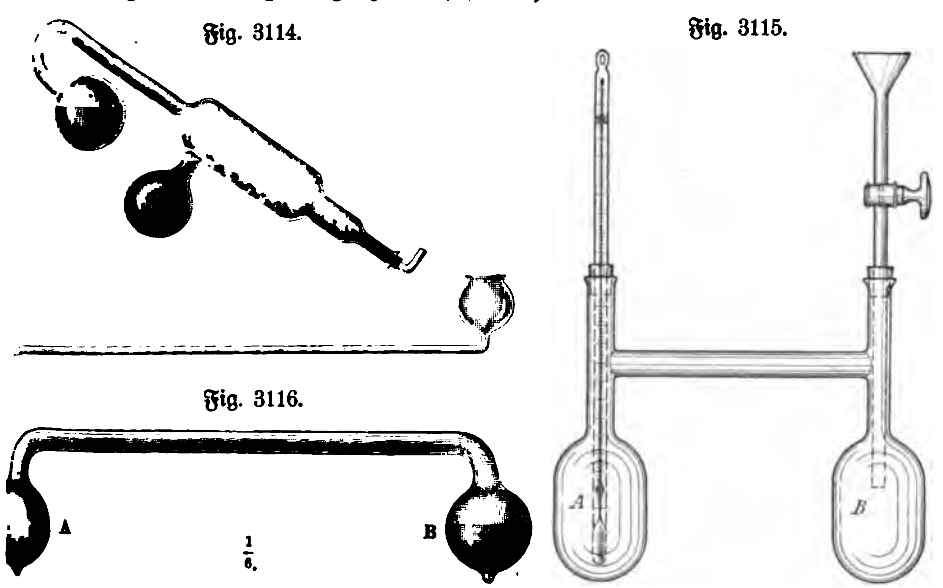


Fig. 3114.

Fig. 3115.

Fig. 3116.

473. **Der Kryophor** ist in Fig. 3116 in etwa ein Sechstel der natürlichen Größe abgebildet. Die Anfertigung des Glases geschieht wie beim Pulshammer. Auch hier zieht man an der Schweißstelle der Röhren dieselben in ein seitliches ausgespitztes Röhrchen aus, oder läßt eine solche Spitze an der einen Kugel. Zur

[1]) Siehe Weinhold, Phys. Demonstrationen, Leipzig 1899, Quandt u. Händel, 3. Aufl., S. 548. — [2]) Zu beziehen von A. Krüß, Hamburg, Adolfbrücke 7.

Füllung wird Wasser genommen und das Auskochen muß über einem breiten Kohlenfeuer geschehen, damit die Röhre in ihrer ganzen Ausdehnung erhitzt werde. Wenn das Kochen des Wassers lange genug gedauert hat, und die eine Kugel von dem noch vorhandenen Wasser nicht mehr ganz zur Hälfte gefüllt wird, schmilzt man die Öffnung der Spitze mit dem Lötrohre an der Weingeistlampe zu. Beim Versuche bringt man alles Wasser in die eine Kugel und taucht die andere in eine Kältemischung aus gestoßenem Eis und Kochsalz, so daß sie und ein Teil der Röhre gehörig damit bedeckt sind. Das Gefäß mit Kältemischung kann man vorher mit Eis umgeben, namentlich wenn es etwas klein ist. Auch empfiehlt es sich, um nicht zu viel Zeit zu verlieren, das Wasser im Kryophor zunächst auf 0° abzukühlen.

Es ist ratsam, den Versuch zu unterbrechen, sobald sich in der freien Kugel eine Eisschicht gebildet hat, weil beim gänzlichen Gefrieren des Wassers die Kugel leicht zersprengt wird, was auch bei der Kugel in der Kältemischung gern geschieht. Macht man den Versuch im Sommer, so muß man, um Beschlagen der Kugel mit Reif zu verhindern, für Luftzug sorgen, damit die Luft möglichst wenig mit Wasserdampf gemischt sei, was bei einem zahlreichen Auditorium leicht der Fall sein kann, doch sollte der Luftzug die Kugel selbst nicht treffen. (Lb, 3.)

Eine bequemere Form des Apparates zeigt Fig. 3117 (E, 3).

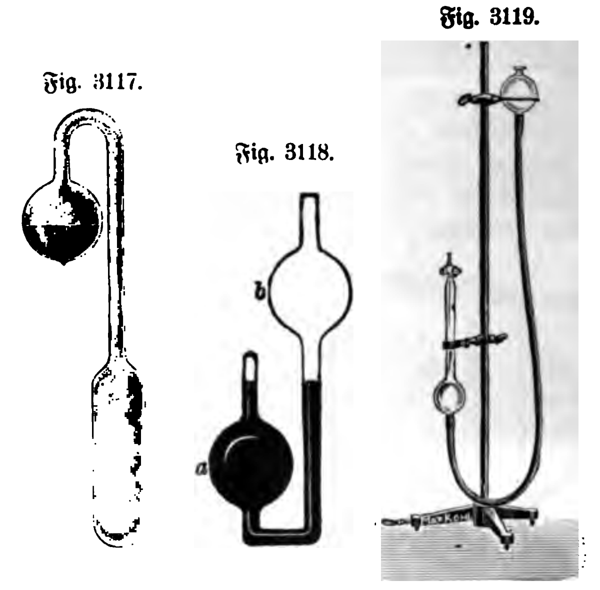


Fig. 3117. Fig. 3118. Fig. 3119.

474. Verflüssigung der Gase durch Abkühlung. Am einfachsten zeigt man dieselbe bei einer der im Handel zu beziehenden, mit verdichteter Kohlensäure gefüllten Röhren, in welcher sich durch Aufträufeln von Äther ein Teil der Kohlensäure zur Flüssigkeit verdichtet, welche alsbald wieder verschwindet, wenn die Temperatur wieder auf Zimmertemperatur gestiegen ist. Der Versuch läßt sich leicht projizieren[1]).

A. W. Hofmann und H. Schulze (1880) benutzen ein etwa 1 m langes, 1,5 cm weites, beiderseits verjüngtes Glasrohr, welches oben durch einen Glashahn (oder einen Kautschukschlauch mit Quetschhahn) verschlossen, unten durch einen dickwandigen, am besten umsponnenen Kautschukschlauch mit einer tubulierten Flasche verbunden ist, in welche Quecksilber eingefüllt wird. Die Röhre wird mit Chloräthyl, Siedepunkt 12°, oder Trimethylamin, Siedepunkt 9°, gefüllt, das man durch Aufspritzen von Äther abkühlt und zu Flüssigkeit verdichten kann, während man dabei die Flasche derart hebt, daß die beiden Quecksilberoberflächen in gleichem Niveau bleiben.

Einen Apparat zu gleichem Zwecke zeigt Fig. 3119 (K, 33).

[1]) Einen Apparat für Verdichtung der schwefligen Säure durch Abkühlung nach Fig. 3118 liefert G. Lorenz in Chemnitz zu 3,50 Mk.

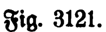
C. Vincent (1878) und Roscoe empfehlen als Abkühlungsmittel flüssiges Methylchlorid, welches durch durchgeleitete Luft bis zu — 55° abgekühlt wird. Sie nnten auf solche Weise leicht große Quantitäten von Quecksilber zum Gefrieren ringen. Tellerier (1878) empfiehlt Trimethylamin.

Donny (1878) warnt vor der Anwendung derjenigen Methoden zur Verüssigung der Gase, bei welchen Gase in einem starkwandigen Gefäße erzeugt und einem engen Rezipienten unter Abkühlung verdichtet werden, weil dabei leicht urch mitgerissene feste Teilchen aus dem Entwickelungsgefäß Verstopfung der Röhren nd infolgedessen Explosion eintreten kann. Man kann übrigens auch im kleinen iese Methode bei Cyangas mittels des Projektionsapparates demonstrieren, indem an in einem Schenkel eines geschlossenen luftleeren U-Rohres Cyanquecksilber erhitzt.

Das Einschmelzen flüssiger Gase in Glasröhren bereitet heute an Orten, wo üssige Luft¹) zu haben ist, keine Schwierigkeit, da unter Anwendung dieses Abühlungsmittels Verflüssigung schon bei gewöhnlichem Atmosphärendruck eintritt.


Fig. 3120.




Fig. 3121.



475. **Eismaschinen.** Carrés Ammoniak-Eismaschine besteht aus einem Ammoakkessel *A* und einem zweiten damit verbundenen Gefäß, dem sogenannten Eisldner *B* (Fig. 3120 Lb, 420 bis 950)²). Beim Gebrauch wird der Kessel, welcher ei Viertel voll mit Ammoniak von 30° Beaumé gefüllt ist, geheizt, bis das in denlben eingehängte Thermometer eine Temperatur von + 150° C anzeigt. Das mmoniakgas verdichtet sich in dem Eisbildner, welcher durch das Wasser in dem efäße *C* gekühlt wird. Alsdann wird die Maschine umgesetzt (Fig. 3121), d. h. der

¹) Die Darstellung derselben kann erst im XII. Kapitel besprochen werden. Man nn sie als Eilgutsendung auch auf große Entfernung beziehen von der Gesellschaft für ndes Eismaschinen in München. — ²) Dr. Bender u. Hobein, München, liefern solche aschinen zu 230 bis 2200 Mk., die Leistung beträgt 1 bezw. 18 kg pro Operation.

75*

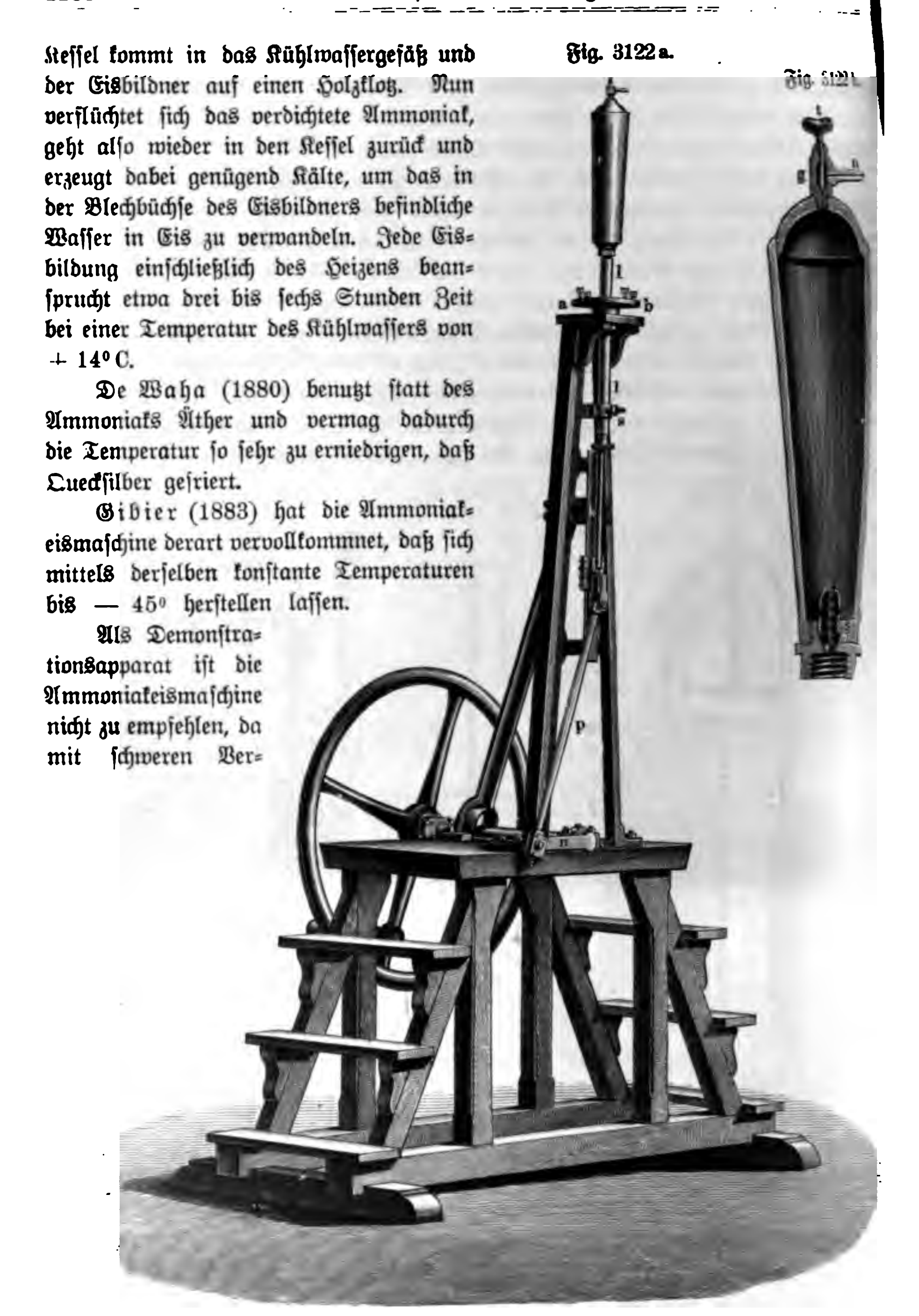
Kessel kommt in das Kühlwassergefäß und der Eisbildner auf einen Holzklotz. Nun verflüchtet sich das verdichtete Ammoniak, geht also wieder in den Kessel zurück und erzeugt dabei genügend Kälte, um das in der Blechbüchse des Eisbildners befindliche Wasser in Eis zu verwandeln. Jede Eisbildung einschließlich des Heizens beansprucht etwa drei bis sechs Stunden Zeit bei einer Temperatur des Kühlwassers von + 14° C.

De Waha (1880) benutzt statt des Ammoniaks Äther und vermag dadurch die Temperatur so sehr zu erniedrigen, daß Quecksilber gefriert.

Gibier (1883) hat die Ammoniakeismaschine derart vervollkommnet, daß sich mittels derselben konstante Temperaturen bis — 45° herstellen lassen.

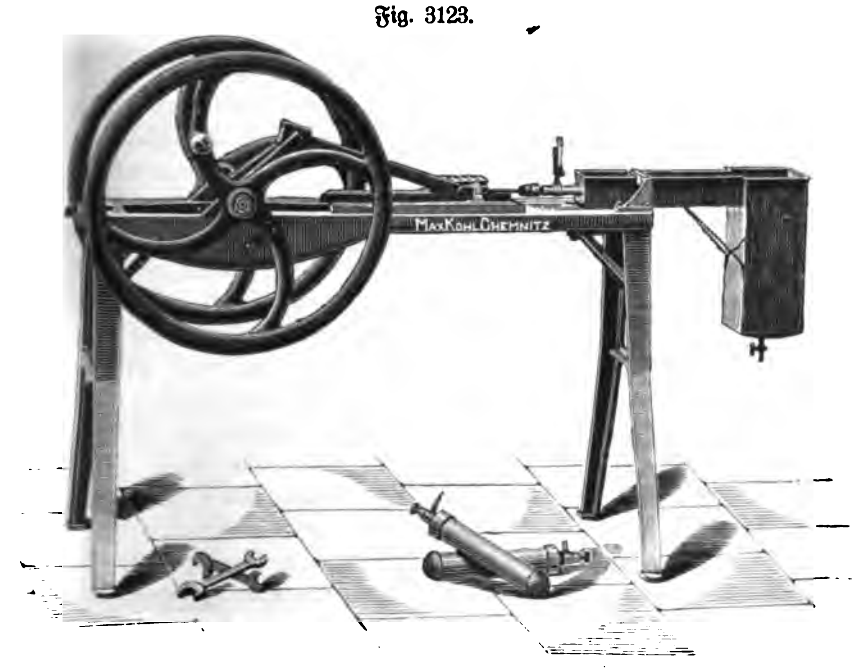
Als Demonstrationsapparat ist die Ammoniakeismaschine nicht zu empfehlen, da mit schweren Verletzungen verbundene Explosionen damit vorgekommen sind. Größere, durch Pumpen betriebene (S. 139), erfordern umständliche Behandlung. (Pictets Flüssigkeit schweflige Säure mit 3 Proz. Kohlensäure, siedet bei — 20° und hat vor Ammoniak den Vorzug, daß sie geringeren Kondensationsdruck erfordert. Äthereismaschinen würden infolge des zu hohen Äthersiedepunkts zu große Kondensatoren erfordern

Fig. 3122a.



176. **Verflüssigung von Kohlensäure.** Am häufigsten wird zur Verflüssigung größerer Gasmengen die Nattererſche Pumpe[1]) (Fig. 3122a und 3122b) benutzt. Mittels eines Schwungrades, der Kurbel *n* und der Pleuelstange *p* wird die in einem starken Stahlcylinder *ll* sich bewegende Kolbenstange *k* in Bewegung gesetzt. Auf dem oberen Ende des Cylinders ist der in Fig. 3122b besonders im Durchschnitt dargestellte Rezipient aufgeschraubt. Auf die Platte *ab* kann außerdem ein kelchartiges Gefäß zur Aufnahme einer Kältemischung, welche den Rezipienten kühl hält, aufgeschraubt werden. An seinem unteren Ende ist der Cylinder mit einem Tubulus *s* versehen, welcher unter Zwischenschaltung von Trockenapparaten mit dem das Gas enthaltenden Gasometer in Verbindung gesetzt wird. Der Kolben bewegt sich bis unter die Öffnung dieses Tubulus herunter, so daß alsdann der

Fig. 3123.



Cylinder sich mit Gas füllt. Beim Wiederaufsteigen des Kolbens wird das Gas in den Rezipienten gedrückt. Letzterer ist mit einem nach innen sich öffnenden Ventil versehen, so daß das Gas nicht wieder zurückströmen kann[2]).

Um zu beurteilen, wie viel Kohlensäure bereits eingepumpt ist, schraubt man den Rezipienten von Zeit zu Zeit ab und wägt ihn. Zu einer Füllung mit 300 g Kohlensäure sind etwa 3000 Kolbenhube erforderlich. Zeitweise muß auch der Kolben neu geölt werden.

Um schließlich die flüssige Kohlensäure aus dem Rezipienten austreten zu lassen, schraubt man diesen ab, stellt ihn umgekehrt auf und öffnet den Schraubhahn an dem unten befindlichen Kopfende.

[1]) Zu beziehen von Mechaniker A. Schultz in Wien X., Favoriten, Eugengasse 65, und auch von P. Stückrath in Berlin (siehe Zeitschr. f. Instrumentenk. 1882, S. 285). — [2]) Max Kohl in Chemnitz baut die Nattererſche Pumpe in liegender Konstruktion (Fig. 3123), welche besser zu handhaben ist, zum Preise von 700 Mk. Eine vertikale Pumpe neuerer Konstruktion ist dargestellt in Fig. 2723; S. 986.

Da man heute Kohlensäure im Handel fertig beziehen kann (vgl. S. 568), dürfte namentlich die Verflüssigung von Äthylen in Betracht kommen. Die Pumpe vermag davon pro Stunde 135 g zu verflüssigen.

Zur Darstellung des Äthylens verwendet man große Glasballons, welche Gemische aus 1 Tl. Alkohol und 5 Tln. Schwefelsäure und ausgeglühten Sand enthalten. Man erhitzt so lange, bis die ersten Spuren von schwefliger Säure bemerkbar werden. Das Gas wird durch zwei Trockenapparate mit schwefelsäuregetränktem Bimsstein, dann durch eine Wasserflasche mit Kalilauge in ein Gasometer von 200 bis 300 Liter Inhalt geleitet und von hier unter Zwischenschaltung einer mit Schwefelsäure gefüllten Waschflasche zur Pumpe.

Das verflüssigte Äthylen kann dazu dienen, die schwieriger zu verflüssigenden Gase, wie Sauerstoff, Stickstoff, Luft u. s. w. auf die zur Verflüssigung nötige Temperatur abzukühlen.

Bei den alten Nattererschen Pumpen zeigte sich (nach v. Wroblewski) manche Unannehmlichkeit, namentlich beim Komprimieren des Sauerstoffs. Es war nämlich die Dichtung des Kolbens durch eine mit Öl getränkte Lederkappe bewirkt. Stieg nun aber der Druck beträchtlich an, so erfolgte bei jedem Kolbenhub eine kleine Explosion, da die Öldämpfe sich infolge der durch die Kompression erzeugten Wärme mit dem Sauerstoff vereinigten. Da trockene Kappen einer zu raschen Abnutzung unterliegen, so ersetzte sie v. Wroblewski durch Asbest, der sich sehr gut bewährte. Wenn nicht gerade mit Sauerstoff gearbeitet wird, befeuchtet man den Kolben mit etwas Knochenöl. Zweckmäßig wird die Pumpe mittels einer Transmission durch einen zweipferdigen Gasmotor getrieben und macht pro Minute 60 bis 65 Spiele (bei Sauerstoff 45) mit einer Hubhöhe von 29 cm.

Auch Cailletet konstruierte einen Apparat zur Darstellung größerer Mengen verflüssigter Gase, der in den Compt. rend. **94**, 623—626, 1882 beschrieben ist. Bei dieser Kompressionspumpe ist jeder schädliche Raum und zugleich zu starke Erhitzung der Pumpe dadurch vermieden, daß der aus weichem Stahl verfertigte Kolben mit einer ziemlich beträchtlichen Quecksilberschicht bedeckt wird. Man kann mit der Pumpe 400 bis 500 g flüssige Kohlensäure oder Stickoxyd pro Stunde erhalten und Gase bis zu 200 Atm. komprimieren. Statt Öl wird zum Schmieren der Stopfbüchsen u. s. w. Glycerin oder besser Vaselin verwendet, da Öl mit Quecksilber sich zu einer fast festen Salbe verbindet. Die Ventile bestehen aus Ebonit. Als Sammelgefäß dient ein System von neun miteinander verbundenen Kupferröhren. Um die Basis des Pumpenkörpers herum läuft ein mit Quecksilber oder Glycerin gefüllter Napf, um das Dichthalten der Stopfbüchse kontrollieren zu können.

477. Anwendung von Kohlensäureschnee. Seitdem flüssige Kohlensäure Handelsartikel geworden ist, ist das Experimentieren mit derselben so sehr vereinfacht, daß die Versuche selbst an weniger gut dotierten Schulen ausführbar sind [1].

---

[1] Zu beziehen von der Aktiengesellschaft für Kohlensäure-Industrie, Berlin NW., Schiffbauerdamm 21, sowie von der „Gesellschaft zum Betriebe der Oberwendiger Kohlensäurewerke“ in Oberlahnstein am Rhein und in größeren Städten von Installateuren, da flüssige Kohlensäure in großer Menge für Bierdruckapparate, Mineralwasserapparate, Feuerlöschapparate u. s. w. gebraucht wird. Über das Arbeiten mit verflüssigten Gasen siehe auch Stock u. Hoffmann, Ber. d. d. chem. Ges. **36**, 895, 1903.

Fig. 3124 (E, 36) zeigt eine gewöhnliche Kohlensäureflasche; die Fig. 3125 (E, 40), 3126 (E, 25) solche, die sich leicht umdrehen lassen, Fig. 3127 ein Stativ zum Schrägstellen.



Fig. 3124.

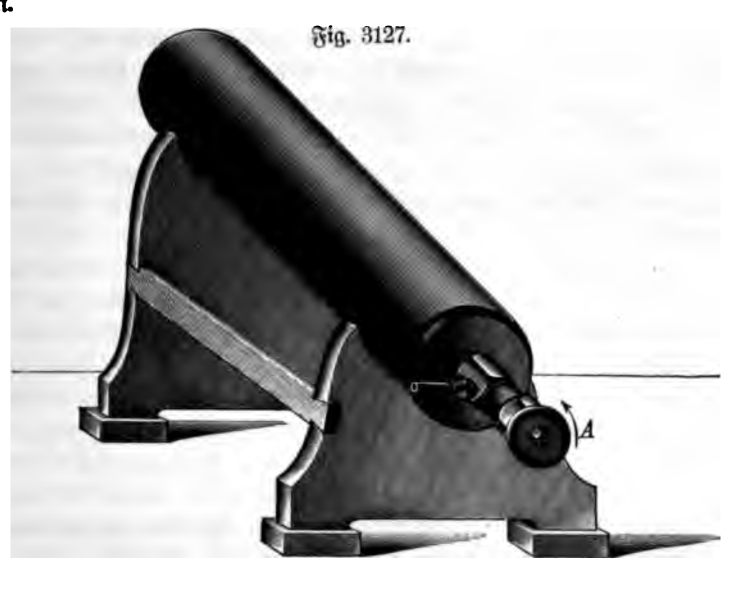


Fig. 3127.



Fig. 3125.



Fig. 3126.

Zuweilen sind die Flaschen nach Art eines Syphons mit einem innen bis auf den Boden herabreichenden Rohr versehen, so daß es nicht notwendig ist, sie umzukehren, wenn man flüssige Kohlensäure erhalten will. Es dürfte aber in diesem Falle leichter Einfrieren eintreten, wenn die Kohlensäure nicht wasserfrei ist.

Um Kohlensäureschnee zu erhalten, läßt man die flüssige Kohlensäure einfach in einen kleinen Sack aus grobem schwarzem Wollstoff oder Sammet einfließen, der den Flaschen auf Verlangen beigegeben wird. Er ist trichterförmig gestaltet und am engen Ende mit einem Holzring zur Befestigung am Ausflußrohr versehen. Das weite offene Ende wird zunächst durch in den Rand eingelegte Schnüre zusammengezogen, so daß ein geschlossener Sack entsteht.

Für den Fall, daß der Hahn der Kohlensäureflasche während des Ausströmens derselben einfriert und sich nicht mehr zudrehen läßt, ist es zweckmäßig, einen Schwamm mit warmem Wasser bereit zu halten, um ihn wieder auftauen zu können.

Sobald der Kohlensäureschnee aus den Poren des Sackes herauszudringen beginnt, schließt man den Hahn, öffnet den Sack durch Lösen der Schnüre und nimmt den gebildeten Schnee mittels eines Horn- oder Holzlöffels aus dem Sack heraus.

Köhler (Chem. Ztg. 8, 1376, 1884) beschreibt ein Verfahren, um den Schnee in einem Glasgefäß zu erzeugen. Ducretet (1884) hat einen hauptsächlich aus Ebonit gefertigten besonderen Rezipienten in den Handel gebracht, der aber wohl entbehrlich sein dürfte.

478. Versuche mit fester Kohlensäure. 1) Man bringt etwas von dem Kohlensäureschnee in eine Gasentwickelungsflasche und führt das gebogene Glasrohr derselben in die pneumatische Wanne, so daß man hier die allmählich wieder gasförmig werdende Kohlensäure auffangen kann.

2) Man bringt etwas Kohlensäureschnee in einen Heronsball, derselbe beginnt zu fließen.

3) Eine unten beschwerte Glasglocke wird in eine Wanne mit Wasser versenkt. Man bringt etwas Kohlensäureschnee hinein, sie erfüllt sich mit Gas und steigt an die Oberfläche.

4) Kohlensäureschnee in ein Reagenzgläschen eingeschlossen, welches fest verkorkt wird (wobei man sich aber vorsehen muß, das Gläschen nicht zu zerdrücken und sich durch Glassplitter zu verletzen), erzeugt eine Explosion. Man läßt sie etwa in einer Kiste oder hinter einer starken Glasscheibe erfolgen, so daß niemand von Splittern getroffen werden kann.

5) Eine Bierflasche mit Patentverschluß wird halb mit abgestandenem Bier gefüllt, etwas (nicht zu viel) Kohlensäureschnee eingebracht und der Kopf nach unten aufgestellt. Bald ist das Bier wieder moussierend geworden.

6) An der Luft liegende feste Kohlensäure bedeckt sich mit einem Schneeüberzug. Ein mit Kohlensäure gefülltes Reagenzgläschen, in eine kleine Wassermenge gebracht, überzieht sich mit kompaktem durchsichtigem Eis.

7) In einem Blocke aus hartem Holze[1]) ist eine schwach konische Bohrung von 15 bis 45 mm Durchmesser angebracht, in welche ein hölzerner Stempel mit etwas Spiel gut einpaßt. Man setzt sie auf eine glatte Holzscheibe, am besten auf einen Amboß, trägt Kohlensäureschnee in kleinen Portionen ein, drückt ihn mittels des Stempels zusammen und bewirkt schließlich durch Hammerschläge auf den letzteren, daß die einzelnen Teilchen zu einer kompakten Masse verschweißen. Man erhält in

[1]) Metallformen sind übrigens auch zu brauchen, nur muß der Stempel mit Rinnen zum Entweichen des Kohlensäuregases versehen sein, da er sonst durch den infolge der beträchtlichen Wärmezufuhr rasch ansteigenden Druck desselben herausgeschleudert wird.

nach Landolt (1884) Cylinder von fester Kohlensäure, die ungefähr gewöhnlicher Schreibkreide gleichen, welche leicht aus der Form herausfallen, wenn man diese mit der weiteren Öffnung auf einen noch weiter ausgebohrten Klotz legt und von der anderen Seite den Stempel eintreibt. Befeuchtet man den Kohlensäureschnee während des Pressens mit Äther, so resultieren durchscheinende, indes weniger zusammenhängende Stäbchen. Die Stäbchen rauchen an der Luft infolge der Bildung von Wassernebeln. Wickelt man ein kreideartiges Stäbchen in dünnes Gummituch und dieses in Watte und Papier ein, so hält sich das Stäbchen etwa fünf Stunden lang. Nach B. Schwalbe (1886) kann man sich im einfachsten Falle auch der kleinen in Laboratorien gebräuchlichen Diamantmörser bedienen, um den Schnee zusammenzupressen. Man erhält so münzähnliche Plättchen von kreideartigem Ansehen, die sich so lange halten, daß man sie herumgeben kann.

8) Schneeartige feste Kohlensäure schwimmt auf Wasser, kompakte sinkt unter.

9) Nach B. Schwalbe (Z. 9, 11, 1896) empfiehlt es sich, das Gefrieren verschiedener Flüssigkeiten, wie Bier oder Wein, Kupfervitriollösung, Kalibichromatlösung und Kochsalzlösung in einem Gemisch von fester Kohlensäure zu zeigen. Von Chemikern wird die Methode zuweilen angewendet, um überkühlte Schmelzen organischer Substanzen zum Erstarren zu bringen.

10) Die Destillation bei niedrigen Temperaturen läßt sich nach B. Schwalbe leicht mit Äther ausführen, indem man das Kühlgefäß in ein Gemisch von Kohlensäureschnee und Äther[1]) bringt.

11) Gießt man nach B. Schwalbe aus einem Löffel Quecksilber in ein Gemisch von Kohlensäureschnee und Äther, so erhält man ähnliche Formen wie beim Eingießen von geschmolzenem Blei in Wasser. Man kann die baumartigen Gebilde mit einer Glashacke herausnehmen.

12) Werden Reagenzgläschen von dünnem Glase 3 bis 4 cm hoch mit Quecksilber gefüllt und in einen Teig aus Kohlensäureschnee und Äther eingebettet, so gefriert das Quecksilber und kann durch Erwärmen des Glases in kaltem Wasser herausgenommen werden. Zweckmäßig läßt man einen dünnen Draht mit einfrieren, um es daran fassen zu können.

Um einen Quecksilberring zu erhalten, gießt man (nach Sandmeyer) Quecksilber in eine ringförmige Nut in einem Brett, bedeckt mit Kohlensäureschnee, und befeuchtet diesen mit Äther. Man kann einen solchen Ring mit einer Tiegelzange fassen und auf dem Amboß hämmern, allerdings nur kurze Zeit.

13) Man bringt das erstarrte Quecksilber (nach Tyndall) in kaltes Wasser. Die sich bildenden Fäden von flüssigem Quecksilber bilden um sich herum Eisröhrchen.

14) Kühlt man nach B. Schwalbe (Z. 9, 16, 1896) stark blauen Jodstärkekleister in dem Kohlensäuregemisch ab, so erhält man eine hellrote Eismasse. Beim Erwärmen entsteht wieder die blaue Flüssigkeit.

---

[1]) Nach Villard und Jarry (Beibl. 25, 19, 1901) bewirkt Zumischung von Äther zu fester Kohlensäure keine Temperaturveränderung. Nach H. Moissan (Compt. rend. 133, 768, 1901) erhält man durch Mischen fester Kohlensäure mit Alkohol —80° mit Methylchlorür oder Chlorylaldehyd —90°, mit Essigäther —95°, mit Aceton —98°. Wird trockene Luft von —80° in das letztgenannte Gemisch geblasen, so sinkt die Temperatur bis gegen 110°. Für extreme Drucke (300 Atm.) dienen Röhren von 1,5 mm innerem und 6 mm äußerem Durchmesser. Stark abgekühlte Röhren dürfen nur langsam und stufenweise erwärmt werden.

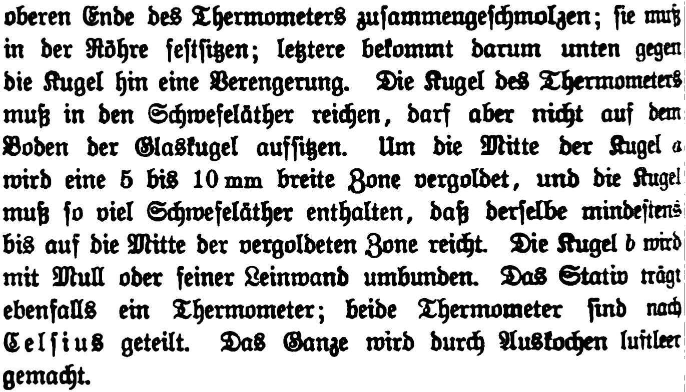
15) Um das chemische Verhalten der Körper bei niedrigen Temperaturen zu zeigen, füllt man ein Reagenzgläschen mit ziemlich konzentrierter Salzsäure etwa 3 cm hoch und stellt es in eine Ätherkohlensäuremischung. In ein anderes Gläschen hat man Marmor in Stücken von 0,5 bis 1,5 cm Größe gebracht und dasselbe schon früher in einen anderen Kältebehälter gesetzt. Auf die vollständige Abkühlung des Marmors ist besonders zu achten. Man gießt dann die Salzsäure zu dem Marmor, dessen Gläschen man dann noch in der Kältemischung läßt. Es zeigt sich beim Herausnehmen nicht die geringste Kohlensäureentwickelung.

Ein anderer Versuch ist folgender: Man kühlt in einem Gläschen absoluten Alkohol, im anderen frisch geschnittenes Natrium, es erfolgt zunächst keine Entwickelung von Wasserstoff, diese wird vielmehr erst beim allmählichen Wärmerwerden bemerkbar. Das Natrium ist sorgfältig von Petroleum und Kruste zu befreien. Alkohol, Phosphor u. s. w. können im stark abgekühlten Zustande nicht entzündet werden. Natürlich sind diese Versuche sehr gefährlich und dürfen nur unter Beobachtung der nötigen Vorsichtsmaßregeln angestellt werden.

16) Temperaturmessungen können mit dem Petroleumäther (Pentan)-Thermometer oder mit dem Luftthermometer ausgeführt werden.

479. Das Schwefelätherhygrometer. Die Skala des in der längeren Röhre eingeschlossenen Thermometers (Fig. 3128) wird von Glas gemacht und mit dem oberen Ende des Thermometers zusammengeschmolzen; sie muß in der Röhre festsitzen; letztere bekommt darum unten gegen die Kugel hin eine Verengerung. Die Kugel des Thermometers muß in den Schwefeläther reichen, darf aber nicht auf dem Boden der Glaskugel aufsitzen. Um die Mitte der Kugel *a* wird eine 5 bis 10 mm breite Zone vergoldet, und die Kugel muß so viel Schwefeläther enthalten, daß derselbe mindestens bis auf die Mitte der vergoldeten Zone reicht. Die Kugel *b* wird mit Mull oder feiner Leinwand umbunden. Das Stativ trägt ebenfalls ein Thermometer; beide Thermometer sind nach Celsius geteilt. Das Ganze wird durch Auskochen luftleer gemacht.


Fig. 3128.



Beim Gebrauche gießt man so viel Schwefeläther auf die Kugel *b*, daß ihr Überzug vollständig naß wird, aber nicht etwa noch Tropfen an der Spitze der Kugel hängen bleiben. Ein Fläschchen wie Fig. 3129, in dessen Pfropf sich ein gebogenes und spitz ausgezogenes Glasrohr befindet, ist hierzu sehr bequem, da die Wärme der Hand hinreichend Schwefeläther aus demselben austreibt. Man beobachtet nicht nur die Temperatur des inneren Thermometers, bei welcher der Beschlag auf dem Goldreif sich bildet, sondern auch jene, bei welcher er wieder verschwindet; das Mittel aus beiden ist der Taupunkt, d. h. die Temperatur, bei welcher die Luft mit ihrem augenblicklichen Dampfgehalt gesättigt ist (vgl. S. 1079), so daß die geringste weitere Abkühlung einen Teil des Wasserdampfes niederschlägt. Um den Tau leicht beobachten zu können, stellt man das Instrument so auf, daß sich in der glänzenden Fläche volles Himmelslicht oder das Licht einer Kerze spiegelt. Ist die Luft dampf-

Fig. 3129.



gesättigt, so ist der Taupunkt gleich der augenblicklichen Temperatur, ist sie sehr trocken, so liegt der Taupunkt wesentlich tiefer. Nach dem Versuche bringt man durch Neigen des Instrumentes den in *b* kondensierten Äther wieder nach *a*. Soll die Beobachtung genau werden, so muß sie durch ein Fernrohr gemacht werden, weil der lange Aufenthalt dicht an dem Instrumente die Angaben unsicher macht.

Spannkraft *e*, absolute Feuchtigkeit *f* und Lufttemperatur *t* hängen durch die Formeln zusammen:

$$e = 0{,}943\,(1 + 0{,}00367 . t) f \qquad f = 1{,}060 \cdot \frac{e}{1 + 0{,}00367 . t},$$

denn die Dichte des Wasserdampfes ist 0,623, also das Gewicht von 1 cbm Dampf:

$$0{,}623 \cdot \frac{1293}{1 + 0{,}00367 . t} \cdot \frac{e}{760} = \frac{1{,}060 . e}{1 + 0{,}00367 . t} \text{ Gramm.}$$

Aus der Temperatur, welche das äußere Thermometer angibt, findet man die Spannkraft, welche der Wasserdampf höchstens annehmen könnte, und der Quotient aus dieser in die nach Angabe des inneren Thermometers wirklich vorhandene Spannkraft gibt die relative Feuchtigkeit der Atmosphäre an.

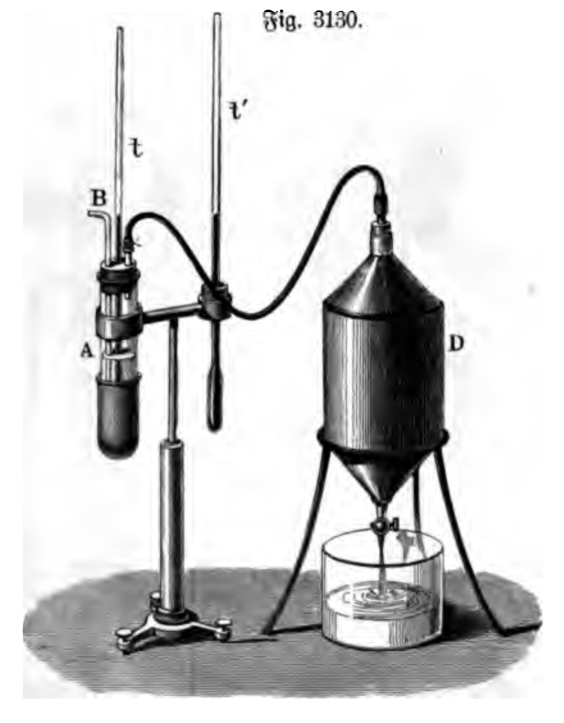


Fig. 3130.

Das Schwefelätherhygrometer nach Regnault. Weil Glas die Wärme schlecht leitet, so hat die Vergoldung des Daniellschen Schwefelätherhygrometers nicht genau dieselbe Temperatur, welche das innere Thermometer angibt, und darum hat Regnault, und früher schon Döbereiner, folgende Abänderung angegeben. An eine Glasröhre *A*, Fig. 3130, ist ein Gefäß aus dünnem, hellpoliertem Silberblech von etwa 2 cm Weite und 4 cm Höhe fest aufgestreift, welches mit Schwefeläther gefüllt wird; andererseits ist die Röhre *A* durch einen Kork geschlossen, durch welchen ein Thermometer *t* und eine Glasröhre *B* bis in den Schwefeläther reichen, während eine zweite Glasröhre nicht länger als der Kork ist. Bläst man nun durch *B* mit dem Munde, so verdampft der Äther und erkaltet dadurch auch das Silberblech, auf welchem man dann den Beschlag beobachten kann, sowie die Temperatur, bei der er stattfindet, während ein zweites Thermometer die Temperatur der Luft angibt.

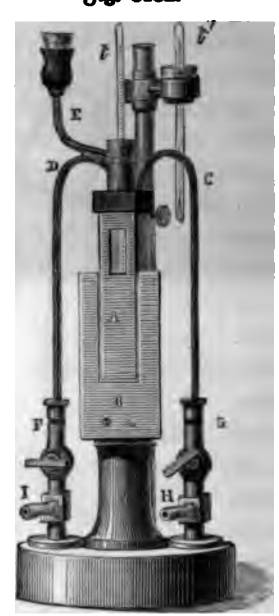
Zweckmäßiger ist es, den Apparat an einem Stativ zu befestigen und die Luft durch einen Aspirator durchsaugen zu lassen, wie die Figur zeigt. Der Aspirator ist einfach ein Blechgefäß, welches mit Wasser durch die obere Öffnung gefüllt wird;

die untere Öffnung ist mit einem Hahn versehen und durch diesen reguliert man den Abfluß des Wassers, also auch den Zufluß der Luft, welcher durch den Schwefeläther stattfinden soll, indem man die obere Öffnung des Blechgefäßes durch Kautschuk mit der kurzen Glasröhre des Hygrometers verbindet. Anstatt eines solchen besonderen Aspirators kann man jede Glasflasche gebrauchen, welche als Mariottesches Gefäß mit Heber eingerichtet ist; der Heber dient als Ausflußrohr, die Luftröhre wird mit dem Hygrometer verbunden und dient zugleich zur Regulierung des Ausflusses. Dadurch wird es möglich, sich ohne große Kosten mit Ausnahme des silbernen Napfes den ganzen Apparat selbst zu machen.

Fig. 3131.

Lambrechts Taupunktspiegel dürfte sich zur Projektion der Bildung des Taubeschlags eignen. Ein ebener, kreisrunder, vernickelter und glänzend polierter Spiegel bildet die Vorderwand einer leichten runden Kapsel, in welche mittels eines Trichterchens etwas Äther eingegossen wird. In der Kapsel befindet sich ein Flügelrädchen, welches beim Einblasen eines Luftstromes mittels eines Blasebalgs in lebhafte Rotation kommt, den Äther rasch zum Verdunsten bringt und dadurch Kälte erzeugt. Die Temperatur wird an einem eingesenkten Thermometer abgelesen, sobald auf der Mitte des Spiegels ein zarter Taubeschlag sich zeigt. (Lambrecht in Göttingen lieferte den Apparat zu 30 bis 36 Mk., Fig. 3131[1]).

Fig. 3132.



A. Schmidt (Z. 12, 132, 1899) empfiehlt, eine vernickelte Metalldose zu nehmen, welche mit Äther gefüllt ist und mit der Wasserluftpumpe Luft hindurch zu saugen.

Loofer (Z. 15, 264, 1902) benutzt für das Taupunkthygrometer durchgeleitetes Leuchtgas zum Verdunsten des Äthers. Ein Teil der ebenen Metallplatte, auf der ein Beschlag erscheinen soll, dient direkt als Wandung des Äthergefäßes, so daß er die Temperatur rasch annimmt und das Auftreten des Beschlages durch Vergleich mit den anderen Teilen der polierten Platte leicht erkennbar wird. Das austretende Leuchtgas wird in einen Bunsenbrenner geleitet, in welchem mit dem Gase auch die Ätherdämpfe verbrennen. Ein ähnliches Hygrometer nach Alluard zeigt Fig. 3132 (Lb, 130).

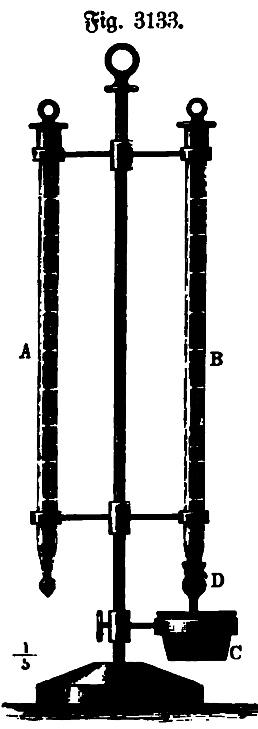
[1]) Auch zu beziehen von Meiser u. Mertig, Dresden N., Kurfürstenstr. 27.

480. Das Psychrometer. Bei diesem Instrumente müssen die Thermometer noch empfindlicher sein als beim vorhergehenden und sollen mindestens in halbe Grade geteilt werden. Beide Thermometer müssen an einem gemeinschaftlichen Gestell so befestigt sein, daß die Kugeln beider unterhalb frei werden. Die umwickelte Kugel wird auch hier nur so befeuchtet, daß kein Wassertropfen an derselben hängt, und es scheint am zweckmäßigsten, zur Umwickelung ein so langes Stückchen Baumwollenzeug oder besser feine Leinwand zu nehmen, daß es von dem Thermometer bis in ein darunter gesetztes Gefäß mit Wasser reicht; das Zeug wird dann um die Kugel gewickelt und über und unter derselben gebunden. Die Kugel bekommt so durch Kapillarität die erforderliche Feuchtigkeit. Allein auch bei reinem Wasser hört dieses nach einiger Zeit auf und man muß eben frisches Zeug um-

Fig. 3134.



Fig. 3133.



wickeln, was ja keine große Arbeit ist. Statt dessen kann man auch unter dem umwickelten Thermometer ein Wassergefäß anbringen und dessen Kugel vor jeder Beobachtung benetzen. Fig. 3133 zeigt ein solches Psychrometer. Das Instrument soll beim Gebrauche in freier Luft sein, aber nicht im starken Zugwinde; unter diesen Umständen läßt sich die Spannung x des Wasserdampfes nach folgender Formel berechnen:

$$x = f - 0{,}000\,80\,(t - t')\,b, \quad \text{wenn } t' > 0^\circ$$

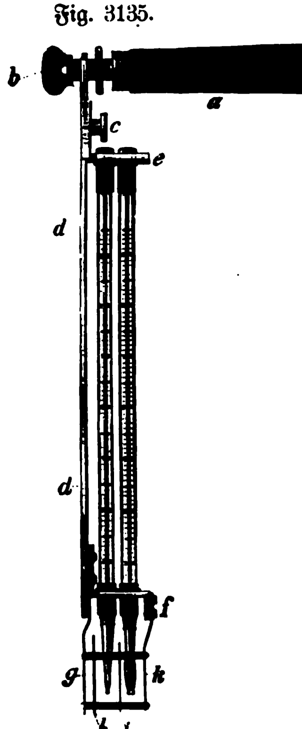
$$x = f - 0{,}000\,69\,(t - t')\,b, \quad \text{wenn } t' < 0^\circ,$$

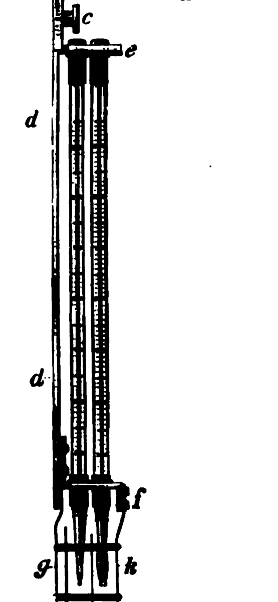
worin f die Spannung des gesättigten Wasserdampfes bei der Temperatur t' in Millimetern, t' die Temperatur des nassen, t jene des trockenen Thermometers nach

Celsius, b den auf 0 reduzierten Barometerstand bedeutet. b hat selten mehr Einfluß als 0,1 mm, und man kann darum, wo nicht die letzte Genauigkeit verlangt ist, den mittleren Barometerstand nehmen und den Faktor b mit der anderen Konstante vereinigen; für $b = 740$ wird dann

$$x = f - 0{,}60\,(t - t'), \quad \text{wenn } t' > 0^{\circ}$$
$$x = f - 0{,}52\,(t - t'), \quad \text{wenn } t' < 0^{\circ}.$$

Fig. 3135.





Will man die Menge y des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes erhalten und bezeichnet q diese Menge im Fall der Sättigung für t', so ist

$$y = q - 0{,}64\,(t - t').$$

Genauere Resultate werden erzielt mit Aßmanns Aspirationspsychrometer, bei welchem mittels eines Federkraftventilators an den durch glänzend polierte metallene Hüllen geschützten Thermometergefäßen ein kräftiger Luftstrom vorbeigeführt wird [1]).

481. Temperaturänderungen durch Druckänderungen bei Gasen. Wird ein Gas verdichtet, so erwärmt es sich, es scheint also eine Entbindung von Wärme stattzufinden, ähnlich wie bei der Verflüssigung eines Gases.

Fig. 3136/37. Fig. 3138.

Wie erheblich die Erwärmung bei rascher Druckzunahme sein kann, zeigt das pneumatische Feuerzeug; dasselbe besteht aus einem metallenen Cylinder AB, Fig. 3136, der unten eine abgerundete breite Basis hat, mit welcher man ihn auf die hohle Hand oder den Tisch stellt, während der Cylinder selbst zwischen Zeige- und Mittelfinger gehalten wird. In diesen Cylinder paßt genau luftdicht ein unten etwas ausgehöhlter Stempel C, Fig. 3137, dessen Stiel wie der Cylinder breit endigt. In der unteren Höhlung des Stempels ist gewöhnlich eine etwas umgebogene Spitze (Fig. 3138), an welche man ein Stückchen Schwamm steckt. Schlägt man nun den vorläufig in den Cylinder gesteckten Stempel mit der anderen Hand kräftig in den Cylinder hinein und zieht ihn rasch wieder heraus, so brennt der Schwamm.

In Bezug auf den Versuch selbst ist noch zu bemerken, daß es gut ist, die Röhre vorher in der Hand oder in anderer Weise auf 30 bis 40° zu erwärmen, da man sonst in den ersten zwei oder drei Stößen kein Feuer erhält.

---

[1]) Zu beziehen nach Fig. 3134 von R. Fueß in Steglitz bei Berlin zu 155 Mk. Besonders für Reisen geeignet ist das Schleuderpsychrometer Fig. 3135, zu beziehen von derselben Firma zu 30 Mk. Bei Secchis Psychrograph wird die Differenz der beiden Thermometer selbsttätig registriert.

Vor jedem Versuch empfiehlt es sich, durch Einblasen, oder falls der Boden des Cylinders abnehmbar ist, durch Durchblasen frische Luft in das Instrument einzuführen.

Kießling (1885) empfiehlt, die Oberfläche des Zündschwammes oder des gelben Baumwollenzünders vorher etwas anzukohlen, ferner der Spitze zum Befestigen die Form eines kleinen Korkziehers zu geben.

Besteht der Cylinder aus Glas [1]) (Fig. 3139), so kann man die Feuererscheinung sehen. Tyndall benutzt hierzu statt des Zunders Baumwolle mit etwas Schwefelkohlenstoff getränkt. Sehr praktisch ist auch ein erbsengroßes Kügelchen von Schießbaumwolle. Es entsteht dabei eine lebhafte, weithin sichtbare Feuererscheinung.

Um die Temperatur zu messen, kann man ein Breguetsches Metallthermometer benützen, welches man unter einen nicht zu großen Rezipienten der Luftpumpe bringt (Fig. 3006, S. 1123).

Man verdünnt die Luft rasch; es erfolgt ein Sinken des Thermometers um ein bis zwei Grade.

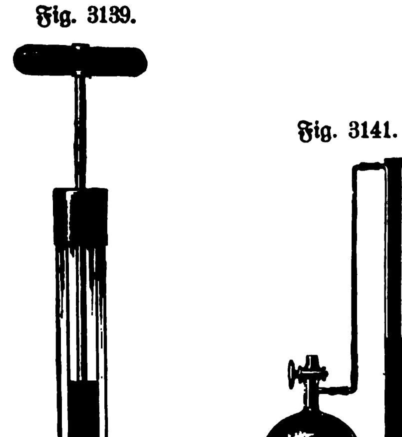


Fig. 3139.

Fig. 3141.



Fig. 3140.

Schließt man nun den Rezipienten ab, läßt den Apparat so lange stehen, bis die Temperatur sich wieder ausgeglichen hat, und läßt Luft zu, so erfolgt ein Steigen des Thermometers. Das Umgekehrte findet statt bei der Verdünnung. Der Erfolg ist sicher, allein immer nur von einigen Wenigen wahrnehmbar.

Zweckmäßig wird der Luftpumpencylinder mit Trieb- und Zahnstange direkt auf das das Thermometer enthaltende Gefäß aufgesetzt. Hähne, Ventile u. dergl. sind entbehrlich (Fig. 3140 Lb, 135).

In einfacher Weise kann man die Abkühlung bei Expansion durch eine große Flasche mit weitem Hahn und angesetztem Wassermanometer, Fig. 3141 (Lb, 30), zeigen.

Verdichtet man die Luft durch Einblasen oder mittels eines Kautschukhandgebläses (Fig. 1523, S. 489), wartet bis der Manometerstand konstant geworden

[1]) Zu beziehen von G. Lorenz in Chemnitz zu 15 Mk.

ist, öffnet dann den Hahn bis das Manometer auf 0 zeigt und schließt ihn sofort wieder, so ändert sich nach und nach der Stand des Manometers im Sinne einer Erwärmung, da sich das bei der Expansion abgekühlte Gas allmählich wieder auf Zimmertemperatur erwärmt und die Flasche wie ein Luftthermoskop wirkt.

Antolik (1891) demonstriert die Expansionskälte, indem er eine geschlossene Schweinsblase, in welcher sich die Kugel eines Thermometers befindet, unter dem Luftpumpenrezipienten sich ausdehnen läßt. Der Stiel des Thermometers ragt durch einen Tubulus des Rezipienten heraus.

Die starke Abkühlung expandierenden Dampfes kann man nach Pernet sehr gut zur Anschauung bringen, indem man die Hand in einen starken Dampfstrahl hineinhält. Kommt man der Ausströmungsöffnung nicht zu nahe, so ist kein Verbrennen zu befürchten.

Wäre die (S. 1198) angeführte Ansicht, die Expansionskälte entspreche der Verdunstungskälte einer Flüssigkeit, richtig, so müßte bei der Expansion eines verdichteten Gases auf den früheren Druck dieselbe Wärmemenge gebunden werden, welche bei der Kompression frei geworden war, also Abkühlung eintreten. Dies ist indes nicht der Fall, wie der Versuch von Joule zeigt.

Zur Demonstration benutze ich zwei große eiserne Kessel mit eingesetzten Luftthermoskopen, von welchen der eine mittels des Kompressors mit verdichteter Luft gefüllt, der andere evakuiert ist (vgl. Fig. 2749, S. 995). Setzt man beide in Verbindung, so sinkt in dem einen die Temperatur ebenso stark als sie im andern steigt, und da die Drucke schließlich (wie die angeschlossenen Manometer erkennen lassen) gleich sind, so müssen auch verschwundene und gewonnene Wärme gleich sein, so daß man sagen kann, die in einem Gase enthaltene Wärmemenge wird durch Expansion ins Vakuum nicht geändert. Die nähere Erklärung dafür, warum in den beiden Kesseln verschiedene Temperatur auftritt und weshalb überhaupt ein Gas bei Verdichtung sich erwärmt und bei Expansion unter dem Drucke der Atmosphäre, d. h. unter gewöhnlichen Umständen, sich abkühlt, kann erst in dem Kapitel Thermodynamik gegeben werden. Dort erst wird deshalb die Abnahme der Temperatur mit der Höhe, Schneegrenze, Wolken- und Regenbildung u. s. w. besprochen.

Fig. 3142.

k

b

a

482. Wärme durch Absorption von Gasen. Die Wärme, welche sich bei der Kondensation der Gase entwickelt, kann man auf folgende Art zeigen. Eine etwa 3 cm weite Glasröhre wird unten durch einen Kork geschlossen, durch welchen das Glasröhrchen *a*, Fig. 3142, gerade hindurch reicht. Auf den Kork bringt man zunächst eine Schicht Baumwolle *b* und darauf eine Schicht grobgepulverter Holzkohle, der man vorher durch die Luftpumpe die aufgenommenen Gase entzogen hat. In die Kohle senkt man das Gefäß eines Thermometers und leitet nun durch *a* Kohlensäure. Das Steigen des Thermometers zeigt die frei gewordene Wärme an.

Looser füllt das Einsatzgefäß der Thermoskopkapsel (S. 1054) mit ausgeglühten Holzkohlenstückchen und läßt Leuchtgas oder Kohlensäure durchströmen. Ebenso kann auch die Abkühlung beim Freiwerden des absorbierten Gases beim Durchleiten von Luft gezeigt werden. Auch bei Anwendung von Wolle oder Baumwolle statt Kohle, ist die Erwärmung deutlich nachzuweisen. Ferner

läßt sich die Erwärmung bei Absorption von Wasserdampf durch Wolle oder Baumwolle mittels des Doppelthermoskops nachweisen. Man umwickelt beide Kapseln mit gleichen Stoffen, stellt die eine über konzentrierte Schwefelsäure, die andere über Wasser (eine Stunde lang) und vertauscht jetzt die Kapseln. Die eine zeigt dann Kondensationswärme, die andere Verdunstungskälte.

483. Die Zündmaschine. Die bei derselben zur Anwendung kommende Flüssigkeit besteht aus mit sechsmal so viel Wasser (dem Gewichte nach) verdünnter Schwefelsäure; statt eines Zinkstückes nimmt man besser aufgerolltes Zinkblech der größeren Oberfläche wegen. Die Menge der Flüssigkeit muß so groß sein, daß sie

Fig. 3143.



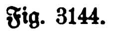


Fig. 3144.



Fig. 3145.

bei ihrem höchsten Stande bis beinahe an die metallene Decke reicht, Fig. 3143 oder 3144 Lb, 7, um möglichst hohen Druck zu erhalten.

Fig. 3146.



Außer dem Hahnverschluß, der übrigens jedenfalls der bequemste ist, gibt es noch einige andere Arten, die jedoch wenig in Gebrauch gekommen sind. Man muß nur beim Ankaufe den Hahn gehörig untersuchen, wobei man darauf zu sehen hat, ob er gehörig schließt, ohne zu fest zu gehen, und ob er nicht nach einigen raschen Drehungen Spuren von Reibung am Gehäuse zeigt. Nach frischem Füllen, sowie wenn die Maschine längere Zeit nicht gebraucht wurde, darf man des darin enthaltenen Knallgases wegen den Gasstrom nicht sogleich anzünden; man läßt daher den Gasbehälter wiederholt gegen ein vor den Platinschwamm gehaltenes Papier sich entleeren. Nach längerem Stehen muß der Platinschwamm durch die auf andere Weise angezündete Gasflamme vorerst ausgeglüht werden, wenn er wieder zünden soll. Die Wirkung als Zündmaschine wird wesentlich befördert, wenn der Platinschwamm [1]), gegen den Gasstrom gerichtet, blanke Fäserchen und Blättchen hat, da diese weniger Wärme ausstrahlen und deshalb höhere Temperatur annehmen.

Ein kleines Platinglühlämpchen kann man sich aus jeder Weingeistlampe herstellen, über deren Docht man eine Platindrahtspirale aufhängt (Fig. 3145). Nach Anzünden und Auslöschen der Flamme glüht die Spirale weiter. Auch mit Leuchtgas gelingt der Versuch, sogar mit einem dünnen Platinblech über einem Bunsenbrenner.

[1]) Zu beziehen von Leybolds Nachf., Köln, zu 7 Mk.

Zweckmäßiger ist ein feines Netz aus Platindraht. Besonders gut eignet sich eine sehr dünne Platinspirale, welche man nach Anleitung von Fig. 3146 über Äther in einem Kelchglas aufhängt (Heumann-Kühling). Auch ein Auerstrumpf erhält sich, einmal ins Glühen gebracht, dauernd glühend, wenn ein für sich nicht brennbares Gemisch von Leuchtgas und Luft zugeleitet wird. Bekannt und überall käuflich sind die selbstzündenden Auerstrümpfe, sowie die Zündpillen zur Selbstzündung von Gasflammen, Bunsenbrennern u. s. w. Hierher gehören ferner die zu medizinischen Zwecken dienenden Benzinglühapparate, bei welchen ein Gemisch von Benzindampf und Luft durch eine mit Platinschwamm angefüllte Metallkapsel geleitet wird. Ebenso wird bei den in Spielwarenhandlungen käuflichen Holzbrandapparaten (Fig. 3147) ein Platinschwamm in Platinhülse durch darüber geleiteten, mit Luft gemischten Petroleumätherdampf ins Glühen gebracht [1]). (Pyrochromie.)

Fig. 3147.



Bei allen diesen Erscheinungen kommt übrigens außer der Absorptionswärme auch die katalytische Wirkung des Platins, bezw. der andern Stoffe, d. h. die Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit durch dieselbe in Betracht.

Allgemein beruht Zündung auf der selbsttätigen Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit durch die bei der Reaktion frei werdende Wärme.

484. Brenner. Verschiedene Brenner und andere Heizapparate wurden bereits auf S. 273 u. ff. beschrieben [2]). Einen sehr großen Gebläsebrenner für eine etwa 1 m lange Stichflamme habe ich für gewisse Demonstrationszwecke aus Gasröhren zusammengesetzt, und zwar ist das Gasausströmungsrohr zweizölliges Eisenrohr, die Luftausströmungsspitze, aus welcher die Luft mit 8 Atmosphären Druck ausströmt, ist nur 0,5 mm weit.

---

[1]) Apparate nach Fig. 3147 liefert die Leipziger Lehrmittelanstalt, Leipzig, Windmühlenstraße 39, zu 10,50 bis 27 Mk. — [2]) Löt- und Kalklichtbrenner nach Fig. 3148 liefert die Sauerstofffabrik, G. m. b. H., Berlin N., Tegelerstr. 15. Beim Gebrauch hat man darauf zu achten, daß stets zuerst das brennbare Gas, wenn solches in eigener Leitung vorhanden, angezündet wird. Erst dann lasse man den Sauerstoff (Druckluft) hinzutreten und reguliere. Bei Beendigung der Arbeit wird umgekehrt verfahren; hier wird der Sauerstoff zuerst geschlossen. Bei Apparaten mit Konushahn schließt dieser beim Zudrehen selbstständig die Druckluft zuerst ab, ebenso wie er beim Öffnen zuerst das Brenngas einreguliert. Mit Hülfe dieses Konushahnes läßt sich eine ganz kleine Zündflamme einstellen.

Bei dem Gasolinbrenner der gleichen Firma muß zuerst die Sauerstoffleitung betätigt werden, damit das Ansaugen des Gasolins bewirkt wird. Beim Verlöschen schließt man hier zuerst den Gashahn. Sauerstoff, Druckluft, Wasserstoff, Leuchtgas liefert dieselbe Firma in Stahlflaschen von 120 bis 5000 Liter Inhalt mit Verschlußventil „Triumph“, welches dichten Verschluß gewährleistet und unliebsame Verluste verhütet (vgl. Fig. 3148).

485. Selbstentzündung. Am einfachsten zeigt die Erscheinung feinzerteilter Phosphor, dadurch erhalten, daß Phosphor in Schwefelkohlenstoff gelöst, die Lösung auf ein Stück Filtrierpapier ausgegossen und der Verdunstung überlassen wird. Nach kurzer Zeit fängt der Phosphor und damit auch das Papier an zu brennen.

Das Zerschneiden des Phosphors muß mit großer Vorsicht unter Wasser geschehen. Beim Abtrocknen, welches durch Betupfen mit Fließpapier möglichst rasch und ohne Reibung geschehen muß, darf man ihn nicht mit den Fingern berühren.

Um den Phosphor allein brennen zu sehen, kann man nach Ohmann (Z. 16, 352, 1903) statt Filtrierpapier zuvor ausgeglühtes Asbestpapier verwenden.

Fig. 3148.



Ein Stück unechtes Blattgold, welches man in eine mit Chlor gefüllte Flasche mit Hilfe eines hakenfömig gebogenen Drahtes einbringt, entzündet sich ebenfalls von selbst; desgleichen Antimonpulver, welches man in Chlor einschüttet. Man kann dasselbe in ein kleines Fläschchen bringen und dieses durch eine Röhre mit der Chlorflasche in Verbindung setzen, doch darf der Stopfen nicht dicht schließen, da sich das Gas durch die Erwärmung stark ausdehnt.

Zu erwähnen wären namentlich auch die Selbstentzündung von Steinkohlen, fettiger Putzwolle und von feuchtem Heu, welche häufig Anlaß zu Bränden geben.

486. Absorptionswärme von Gasen. Brandstätter (Z. 9, 175, 1896) verbindet zwei Gaswaschflaschen mit eingesetztem Thermometer, von welchen die erste

mit Salmiakgeist, die andere mit reinem Wasser gefüllt ist, und leitet Luft hindurch; es sinkt das Thermometer im ersten infolge des Freiwerdens von Ammoniak und steigt im zweiten infolge der Absorption desselben. Besonders gut eignet sich dazu das Looser sche Doppelthermoskop (S. 1054).

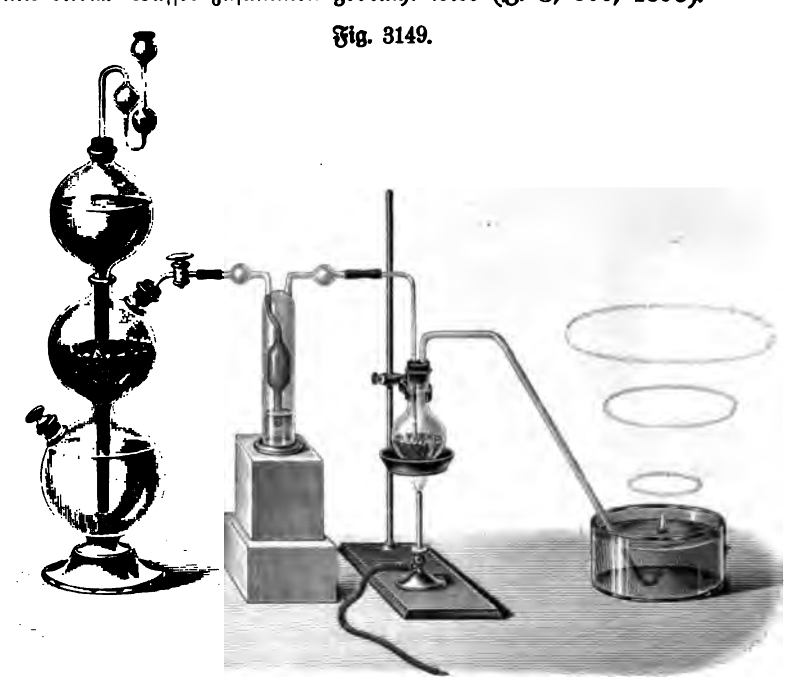
Ein hervorragendes Beispiel ist die Entstehung der Blutwärme durch Absorption von Sauerstoff.

487. Der Natrondampfkessel. Der abziehende Dampf wird bei der Maschine von Honigmann in einen offenen Kessel mit konzentrierter Natronlauge geleitet, welcher den Dampfkessel umgibt oder sich im Inneren desselben befindet. Hier kondensiert sich der Dampf und erzeugt dadurch solche Temperaturerhöhung, daß die Temperaturabnahme des Dampfkessels infolge der Dampfbildung gerade gedeckt wird, so daß es nicht nötig ist, ein Feuer unter dem Kessel zu erhalten. Schließlich wird allerdings die Natronlauge zu sehr verdünnt und muß dann wieder abgedampft werden, wozu noch mehr Wärme nötig ist als direkte Heizung des Kessels erfordert hätte.

Bei Demonstration, daß tatsächlich Erhitzung von Natronlauge auf über 100° durch eingeleiteten Dampf von 100° erfolgt, erhitzt man zweckmäßig die Natronlauge schon vorher auf 100°, da sie sonst zu rasch verdünnt wird. Der Fall ist besonders dadurch interessant, daß es sich nicht um eigentlich chemische Bindung des Dampfes durch die Lauge handelt, wenn auch Hydratbildung die Absorption begleitet.

Die Wärmeentwickelung bei Bildung kristallwasserhaltiger Verbindungen zeigt Looser mit entwässertem Kupfervitriol, welcher in dem Einsatzgefäß des Thermoskops mit etwas Wasser zusammen gebracht wird (Z. 8, 300, 1895).

Fig. 3149.



488. Chemische Verbindungswärme von Gasen. Ein besonders schönes Demonstrationsexperiment für das Auftreten von Wärme bei Mischung von Gasen,

die chemisch aufeinander einwirken, ist die Selbstentzündung von Phosphorwasserstoffgas, durch Erhitzen von Phosphor in Kalilauge dargestellt. Man läßt es durch ein weites Rohr in der pneumatischen Wanne in Blasen aufsteigen. Dieselben entzünden sich, sobald sie an die Luft kommen. Zur Verhütung von Explosionen leitet man vor und nach dem Versuch Wasserstoff durch den Apparat (Fig. 3149, nach Heumann-Kühling).

489. Wärmeerzeugung durch Verbrennung. 1) Beaumés leichter Fluß. Derselbe besteht aus 3 Tln. gepulvertem Salpeter, 1 Tl. Schwefelblumen und 1 Tl. feiner Sägespäne, am besten buchener, welche Substanzen gehörig gemengt werden. Wenn man eine Nußschale mit dieser Masse fest anfüllt, eine kleine Silbermünze oder auch ein Stückchen von dünnem Messingblech darauf legt und noch etwas von der Masse oben darauf drückt, so schmilzt das Metall während der heftigen Verbrennung. Man kann das Gemenge vorrätig aufbewahren, nur muß man dasselbe jedesmal vor dem Gebrauche frisch mengen, da sich die Substanzen gern voneinander sondern, wenn die dieselben enthaltende Schachtel gerüttelt wird. Das Anzünden geschieht mittels eines Spänchens.

Rascher entzündet sich die Masse, wenn man sie mit Schießpulver bestreut und dieses anzündet.

2) Schmilzt man in einem Reagenzgläschen eine kleine Quantität Salpeter und läßt von oben ein Stückchen Schwefel hineinfallen, so entwickelt sich durch die Verbindung des Schwefels mit dem Sauerstoff des Salpeters so viel Wärme, daß in der Regel die Glaswände an der betreffenden Stelle schmelzen und der untere Teil des Reagensglases herabtropft. (Vorsicht!)

3) Knallpulver wird erhalten durch Mischen von 3 Tln. wohlgetrocknetem Salpeter mit 1 Tl. vollständig entwässertem kohlensaurem Kalium und 1 Tl. Schwefel. Man bringt eine Messerspitze voll der Mischung auf ein Stück Eisenblech, welches sich auf einem Drahtdreieck auf einem Dreifuß befindet und erhitzt mit Vorsicht bis zum Schmelzen. Es erfolgt eine so heftige Explosion, daß das Blech und Drahtdreieck verbogen werden.

4) Schießpulver. Um sich solches selbst herzustellen, pulverisiert man 8 Tle. trockenen Salpeter sehr fein in einer Reibschale, dann ebenso 1 Tl. Schwefel und 1 Tl. Holzkohle und mischt schließlich die drei Pulver möglichst innig, aber ohne Anwendung von Druck. Das Erhitzen kann auf einem Stück Eisenblech geschehen.

5) Aus 2 Tln. Eisenstaub (Ferrum limatum oder alcoholisatum der Apotheken), 1 Tl. Schwefel und 3 Tln. Salpeter kann man nach A. W. Hofmann ein Eisenschießpulver herstellen. 48 Tle. Salpeter, 13¼ Tle. Schwefel und 17¼ Tle. Schwefelantimon geben indisches Weißfeuer u. s. w.

6) Sehr hohe Temperaturen erhielt Zenghelis durch Einbringen von Aluminiumpulver in einen hocherhitzten Tiegel, in welchen gleichzeitig ein Sauerstoffstrom geleitet wurde. Ein großer Teil des Sauerstoffs wurde dabei in Ozon verwandelt.

7) Thermit. H. Goldschmidt hat gefunden, daß es mit Hilfe sogenannter „Zündkirschen", welche der Hauptsache nach aus Aluminiumpulver und einem Körper, der leicht Sauerstoff abgibt, z. B. Salpeter oder Baryumsuperoxyd, bestehen, gelingt, ein Gemenge von Aluminiumpulver und Metalloxyden, Thermit [1]) genannt,

---

[1]) Der Aluminothermit (Z. 14, 109, 1901) wird hergestellt von der Allgemeinen Thermitgesellschaft in Essen.

anzuzünden, wie man ein gewöhnliches Feuer anzündet. Man benutzt dazu am besten ein Sturmstreichholz, welches man mit einer Zange hält. Die Masse glüht, wenn sie angezündet ist, weiter, etwa wie Kohlen, die man in Brand gesteckt hat, die entstehende Temperatur ist aber eine so hohe, daß die beiden Verbrennungsprodukte, Aluminiumoxyd und reines Eisen, nicht nur vollkommen flüssig werden, sondern sogar kaltes Eisen zum Schmelzen bringen können [1]). Besonderen Effekt

[1]) Die für Vorlesungsexperimente nötigen Utensilien sind zu beziehen von den „Vereinigten Fabriken", G. m. b. H., Berlin N., Chausseestraße 3. Ein vollständig vorbereiteter Versuch zum Weißglühendmachen eines 3 kg schweren Nietes im Holzeimer mit starkem Blechbehälter kostet 45 Mk. Die Ausführung ist folgende: Nach Entfernung des Blecheimers ist der Holzdeckel abzunehmen und die obere Sandschicht bis auf das Papier abzufüllen. Das Papier ist dann hochzukippen, so daß das Thermit frei liegt. Auf dieses ist noch ein kleiner Löffel Entzündungsgemisch aufzustreuen und dann die Zündkirsche, die vorher in Brand gesetzt ist, aufzuwerfen. Erst nachdem die ganze Oberfläche in Reaktion übergegangen ist, ist staubtrockener Sand aufzuwerfen, so daß der Eimer völlig gefüllt ist. Es schlagen dann noch einige Flammen heraus, die von der verbrennenden Papierhülle herrühren. Nachdem die Entzündung eingetreten ist, muß man etwa 15 bis 20 Minuten warten, bevor man den Eimer umstülpt. Es liegt dann der weißglühende Niet in der weißglühenden Schlacke eingebettet, die nun mit einem großen Hammer mit langem Stiel abgeschlagen werden muß. Dabei ist natürlich ein Funkensprühen nicht zu vermeiden, und falls das Experiment in einem Raume vorgeführt werden soll, der keinen feuerfesten Fußboden hat, so muß eine wenigstens 4 qm große Fläche aus zusammengesetzten Ziegelsteinen hergestellt werden, die noch mit Sand zu bestreuen ist. Um die Schlacke besser abschlagen zu können, empfiehlt es sich, außerdem noch eine Eisenplatte von etwa Quadratmeter-Größe auf diese Schicht zu legen. Das Abschlagen der Schlacke macht sich aber am schnellsten und besten, wenn ein Amboß zur Verfügung steht. Vermittelst einer kräftigen Zange wird dann von einer Person das Stück auf diesen gelegt, während eine andere mit dem Hammer die Schlackenschicht abschlägt. Eine schmiedeeiserne Platte von 10 mm Dicke und 25 × 25 cm Durchmesser (Preis 3 Mk.) kann dazu dienen, die gleichmäßige schnelle Anwärmung einer einzigen Stelle besonders deutlich zu zeigen. Man legt die Platte so auf hochkantig gestellte Ziegelsteine, daß sie hohl liegt. Auf die Mitte dieser Platte wird mit Hilfe von vier Ziegelsteinen und Formsand oder Lehm zum Verdichten der Fugen ein Raum von etwa 1 qdcm abgegrenzt. In diesen Raum wird 1 kg Sinterthermit eingeschüttet, lose angedrückt und die Entzündung desselben, wie in Versuch I beschrieben, vorgenommen. Bei allen diesen Versuchen ist zum Schutze der Augen eine Brille mit dunklen Gläsern zu tragen! Nach kurzer Zeit sieht man dann auf der Unterseite der Platte deutlich ein rotglühendes Viereck hervortreten, während die daneben liegenden Stellen anfänglich so kalt bleiben, daß man sie mit der Hand anfassen kann. Nach einigen Minuten sind die Ziegelsteine fortzunehmen. Das zusammengesinterte Thermit läßt sich meist schon durch Kippen der Platte entfernen. 3 kg Sinterthermit kosten 8,25 Mk. Für manche Zwecke wird das sogenannte automatische Verfahren benutzt. Hierzu dient ein Tiegel mit einer aus durchbohrtem Magnesiastein gebildeten 10 mm weiten Ausflußöffnung, welche mit zwei Asbestscheibchen und einem Eisenblättchen verschlossen wird. Der Tiegel wird mit 9 kg Thermit schwarz gefüllt (Preis 25 Mk.) und das Ausfließen der geschmolzenen Masse mittels eines besonderen „Abstichapparates" (Preis 7,50 Mk.) zum Durchstechen der Eisenblättchen veranlaßt. Die Wirkung des ausfließenden Thermiteisens wird an dem Durchschmelzen einer eisernen Platte besonders gut veranschaulicht. Will man beispielsweise eine eiserne Platte von 15 mm Dicke hierzu verwenden, so gebe man in einen Abstichtiegel Nr. II von 25 cm Höhe 3 kg Thermit schwarz. Unter den Tiegel stelle man die Eisenplatte schräg auf, etwa an einen hochkantig aufgestellten Mauerstein. Zur Aufnahme des ausfließenden Reaktionsproduktes dient am besten ein aus etwa 20 Mauersteinen abgegrenzter Raum von 75 × 75 cm im Geviert, dessen Boden gleichfalls aus zusammengelegten Mauersteinen hergestellt und mit einer dünnen, trockenen Sandschicht bestreut

macht z. B. das **Abschmelzen einer dicken Eisenstange**, welche man mit einem Ende in die Masse eintaucht. Zu beachten ist, daß Tiegel und alle benutzten Materialien vollkommen trocken sein müssen und daß keine leicht entzündlichen Gegenstände in der Nähe sind. Die Augen schützt man durch eine dunkle Brille, die Hände durch starke Lederhandschuhe. Die Zuhörer dürfen nicht zu nahe herantreten.

Die bei der Entzündung der Aluminiummischung freiwerdende Wärme findet mannigfache Anwendung, z. B. zum **Schweißen von Eisenbahnschienen, Gasröhren**, Einschmelzen von Löchern in Eisenplatten, Reparaturen aller Art, z. B. von **Schiffswellen** u. s. w.

Ferner werden nach dem **Goldschmidtschen** Verfahren Chrom und Mangan im großen gewonnen, von denen ersteres zur Herstellung von Chromstahl dient, letzteres zur Herstellung von Mangankupferlegierungen, weiter Mangantitan, welches geeignet ist blasenfreie Stahlgüsse zu erzeugen, da der vom flüssigen Eisen gelöste Stickstoff vom Titan absorbiert wird. Auch Nickel und Kobalt können rein hergestellt werden, sowie Ferrobor und Ferrovanadin, welche zur Herstellung von Spezialstählen, dem Vor- und Vanadinstahl, dienen. Die abfallende Schlacke, welche wie Korund oder Schmirgel aus Aluminiumoxyd besteht, bildet ein als **Korubin** in den Handel gebrachtes Schleifmaterial und dient ferner zur Herstellung feuerfester Steine, Tiegel u. s. w.

Fig. 3150.



490. Spontan explodierende Körper. 1) **Chlorstickstoff**. **Heumann**[1]) beschreibt die Darstellung desselben, welche große Vorsicht erfordert, in folgender Weise:

„1. Eine etwa 200 bis 250 cbcm fassende, im Inneren vollkommen reine und **staubfreie Glasbirne von ganz dünnem Glas**, deren dünnwandiger, aber

---

wird. Die durchzuschmelzende Stelle der Platte muß etwa 10 bis 20 cm vom Ausflußloch des Tiegels abstehen. Dieser Versuch kann auch ohne Anwendung des Abstichapparates ausgeführt werden; man verschließt dann das Ausflußloch lediglich mit dem runden Eisenplättchen und untergelegten Asbestscheibchen, gibt also keinen Sand oder dergl. auf. Das Durchschmelzen des Verschlusses besorgt dann das am Boden des Tiegels sich schnell ansammelnde Thermiteisen. Zumeist erfolgt aber dieses Durchschmelzen des Verschlußplättchens, bevor noch alles Thermit im Tiegel abgebrannt ist; deswegen ist es (besonders für den nächsten Versuch) besser, den Abstichapparat zu benutzen. Durch das ausfließende Eisen entsteht sofort ein scharfkantiges, fingerdickes Loch in der Platte, wäh end diese selbst infolge des schnellen Durchschmelzens kaum erwärmt wird (Fig. 3150).

[1]) Siehe auch **Heumann-Kühling**, Anleitung zum Experimentieren bei Vorlesungen über anorganische Chemie, 3. Aufl. Braunschweig 1904, Friedr. Vieweg u. Sohn.

weiter Hals sich allmählich zur Kugel ausbreitet, Fig. 3151, wird durch Einleiten von Chlorgas auf trockenem Wege mit diesem Gase gefüllt. Während dessen löst man etwa 30 g reinen, von brenzlichen Ölen und Staub freien Salmiak in destilliertem Wasser auf, filtriert wenn nötig und verdünnt die Lösung mit destilliertem Wasser bis zu 1 Liter. In einer etwas großen Bleischale wird diese Flüssigkeit auf 32° erwärmt, worauf man nach Entfernung der Wärmequelle die mit Chlor gefüllte verkorkte Glasbirne in einer Ecke des Vorlesungssaales mit dem Halse in die Salmiaklösung taucht und durch den Ring eines Stativs stützt. Hierauf wird der Kork entfernt.

Alsdann schiebt man ein Bleischälchen, welches etwas größer als die Halsweite der Birne sein muß, unter deren Hals in die Flüssigkeit hinein. Die Öffnung des Kugelhalses muß soweit unter die Flüssigkeit getaucht sein, daß selbst für den Fall, wenn die ganze Birne sich mit Salmiaklösung gefüllt hat, was ja infolge der Chlorabsorption später geschieht, die Halsöffnung noch vollständig durch die Flüssigkeit in der Schale abgesperrt bleibt; anderenfalls tritt Luft ein und infolge der hierdurch verursachten Bewegung der Flüssigkeit würde der Chlorstickstoff aus dem Bleischälchen weggeschwemmt. Das Chlorgas wird absorbiert und nach einigen Augenblicken beginnt die Flüssigkeit in die Kugel zu steigen. Sobald die Hälfte derselben gefüllt ist (wozu fünf bis zehn Minuten, je nach der Temperatur der sich abkühlenden Salmiaklösung, nötig sein werden), kondensiert sich der anfänglich als Dampf dem noch nicht absorbierten Chlorgas beigemengte Chlorstickstoff zu einem tief gelben Öltropfen, welcher größtenteils oben auf der Salmiaklösung in der Kugel schwimmt. Ist von letzterer etwa Dreiviertel mit Flüssigkeit gefüllt, so ist die gebildete Chlorstickstoffmenge zu einem Explosionsversuch völlig ausreichend.

Fig. 3151.



Nun versieht man beide Hände mit dicken, aber nicht allzu steifen Lederhandschuhen, schützt das Gesicht durch ein vorgehaltenes Netz aus starkem Eisendraht oder besser durch eine Drahtmaske und nähert sich dem Apparat. Nur für den Fall, daß der meiste entstandene Chlorstickstoff noch oben schwimmt, rüttelt man vorsichtig an der Kugel, wobei Sorge getragen werden muß, daß ihre untere Öffnung nicht aus der Flüssigkeit heraustritt, weil sonst Luft in die Kugel gelangen und der Chlorstickstoff aus dem Schälchen herausgeschwemmt werden könnte.

Wenn bereits eine genügende Menge Chlorstickstoff herabgefallen ist, so unterlasse man in jedem Falle das Rütteln, wenn auch noch ein Tröpfchen Chlorstickstoff oben hängt, denn bei dieser Manipulation ist Explosion am meisten zu befürchten.

Hat sich ein erbsengroßes Tröpfchen des Körpers im Bleischälchen angesammelt, so zieht man letzteres mit einer Zange aus der Flüssigkeit heraus, ohne an den

Kugelhals zu stoßen. Ein zweites Bleischälchen wird nun an die Stelle des ersten gebracht, für den Fall daß noch Öltröpfchen herabfallen dürften.

Das Schälchen, welches den mit Salmiaklösung bedeckten Chlorstickstoff enthält, wird nun — genügend vom Apparat entfernt — auf den Tisch gestellt. Einen Teil der überstehenden Flüssigkeit kann man nun ohne jede Gefahr in eine Schale abgießen, doch so, daß der Öltropfen noch völlig von Salmiaklösung bedeckt bleibt, weil er sonst auseinanderfließt. Um den Chlorstickstoff zur Explosion zu bringen, taucht man eine Feder, welche an einem 1 m langen Stock befestigt ist, in Terpentinöl und rührt mit der benetzten Feder in dem Bleischälchen herum. Augenblicklich explodiert der Chlorstickstoff mit Flamme und erschütterndem Knall und schleudert die über ihm befindliche Flüssigkeit mehrere Meter hoch in die Luft. Das Bleischälchen zeigt sich in der Regel an der Stelle, wo sich der Chlorstickstoff befand, mehr oder weniger eingedrückt.

Am geeignetsten erscheint es — im Falle man sich überhaupt damit abgeben will — die Darstellung des Chlorstickstoffs kurz vor Beginn der Vorlesung auszuführen und das Bleischälchen, welches den mit Salmiaklösung bedeckten Öltropfen enthält, an einem sicheren Orte im Vorlesungssaale aufzubewahren. Kommt es auf einige Minuten Zeit nicht an, so kann immerhin die Absorption des Chlorgases u. s. w. in der Vorlesung selbst vorgenommen werden. Den Apparat, welcher nach Wegnahme des Bleischälchens stets noch etwas Chlorstickstoff enthalten wird, nimmt man keinesfalls sogleich auseinander, weil ein anhängendes Chlorstickstofftröpfchen explodieren und die Gefäße zerschmettern könnte. Besser ist es, die ganze Vorrichtung einige Tage sich selbst zu überlassen, bis etwa vorhanden gewesener Chlorstickstoff sich allmählich zersetzt haben wird.

Es bedarf wohl kaum der Erläuterung, weshalb eine sehr dünnwandige Glaskugel und keine gewöhnliche Flasche zur Anwendung empfohlen wurde. Sollte ja einmal durch unvorsichtige Behandlung des Apparats u. s. w. Explosion eintreten, so wird die Bleischale nach unten ausgebogen, während die dünnen in die Luft geschleuderten Glasscherben der Kugel bei weitem nicht so gefährlich sind, als Stücke einer starken Glasflasche.

Wenn man nicht im Besitz einer derartig geformten dünnwandigen Glaskugel ist, so schmelze man eine möglichst dünnwandige Glasröhre von etwa 30 cm Länge und 3,5 cm Weite an einem Ende zu und benutze sie statt der Kugel genau in der angegebenen Weise. Selbstverständlich ist es, daß die Röhre durch eine Klammer über der Bleischale befestigt werden muß. Wegen der geringeren Flüssigkeitsoberfläche dauert die Absorption des Chlorgases etwas länger wie bei Anwendung einer Glaskugel."

Die beschriebene Darstellungsweise des Chlorstickstoffs darf nur von experimentell durchgebildeten Chemikern von Fach und niemals von Dilettanten ausgeführt werden, denn allein erstere besitzen jene Erfahrung und ruhige Umsicht, welche auch im kritischen Falle befähigt, zur rechten Zeit das Richtige zu treffen [1]).

[1]) Nach Untersuchungen von Gattermann (1888) kann man mit Chlorstickstoff ohne erhebliche Gefahr operieren, wenn man dafür Sorge trägt, daß derselbe nirgends mit einer Spur organischer Substanz in Berührung kommt und niemals von direktem Sonnenlicht getroffen wird. Über Ausführung des Experiments in größerem Maßstabe (Explosion im Glaskolben) nach V. Meyer siehe Heumann-Kühling, Anleitung zum Experimentieren, 3. Aufl., 1904, S. 349.

„2. Ganz im kleinen und völlig gefahrlos läßt sich die Bildung und Verpuffung des Chlorstickstoffs in folgender, sehr zu empfehlender Weise ausführen.

Eine trichterförmige Zersetzungszelle, wie man sie zur Elektrolyse des Wassers benutzte, bezw. ein Glastrog mit eingeschmolzenen Platinelektroden, wird mit konzentrierter und auf 28° bis 30° erwärmter Salmiaklösung bis über die Platinplatten gefüllt und dann noch eine linienbicke Schicht Terpentinöl aufgegossen. Verbindet man nun die Platinplatten mit den Poldrähten einer Batterie, deren Stärke derjenigen von etwa vier Bunsenschen Elementen gewöhnlicher Größe gleichkommt, bezw. mit einer Stromquelle von etwa 0,5 Amp. Stromstärke (event. zwei hintereinander geschalteten Akkumulatoren), so entwickelt sich an der positiven Polplatte oder Anode Chlorgas, welches mit überschüssiger Salmiaklösung zusammentrifft und Chlorstickstoff bildet. Sobald die Öltröpfchen Stecknadelknopfgröße erlangt haben, steigen sie in der Flüssigkeit in die Höhe und explodieren bei der Berührung mit der Terpentinölschicht unter Feuererscheinung.

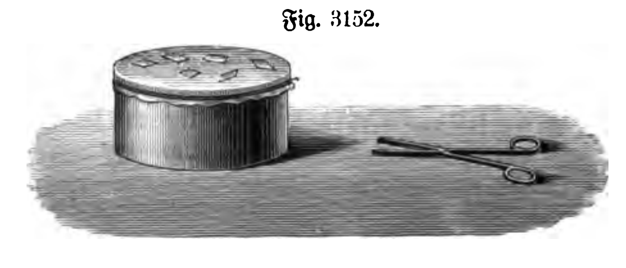
Ist der Strom zu stark und die Lösung warm, so entzündet sich häufig das aufschwimmende Terpentinöl; es ist deshalb eine große Glasplatte bereit zu halten, mit welcher man den Trichter bedeckt, um die Flamme auszulöschen.

Nach Beendigung des Versuches ist der Apparat erst dann zu reinigen, wenn man sich überzeugt hat, daß sich am Boden des Trichters nicht etwa ein Öltropfen abgesetzt hat, welcher bei seiner nachträglichen Explosion vielleicht den Apparat zertrümmern könnte. In der Regel werden die Öltröpfchen durch die Gasentwickelung sämtlich in die Höhe gerissen und verpuffen im Terpentinöl; die Spuren von Chlorstickstoff, welche an den Platinplatten hängen bleiben, sind durchaus nicht zu fürchten. Sollte indes durch irgend welchen Zufall sich ein größerer Öltropfen am Boden des Trichters abgesetzt haben, so läßt man den Apparat an einem unzugänglichen Orte einige Tage stehen, bis sich der Chlorstickstoff von selbst zersetzt hat."

2) Jodstickstoff. Konzentrierte alkoholische Jodlösung wird mit konzentriertem Salmiakgeist vermischt. Der entstehende schwarze Niederschlag ist sogenannter Jodstickstoff. Ich gebe nachfolgend die Anleitung zum Experimentieren damit, ebenfalls nach Heumann.

„1. Darstellung. Am Tage vor der betreffenden Vorlesung verteilt man in etwa drei bis vier Porzellanschälchen kleine Portionen (je eine Messerspitze voll) sehr fein gepulverten Jods und übergießt dasselbe mit konzentriertem Salmiakgeist. Nach einer halben Stunde, während deren der Inhalt der Schalen öfters mit einem Glasstabe umgerührt worden war, gießt man die Flüssigkeiten samt dem schwarzen Bodensatz auf ein Filter von 8 bis 10 cm Radius, wäscht den Jodstickstoff mit etwas Alkohol so lange aus, bis letzterer nur noch stark gelb, aber nicht mehr dunkelbraun (von freiem Jod) gefärbt abläuft, und verdrängt schließlich den Alkohol durch destilliertes Wasser. Ist letzteres gut abgetropft, so nimmt man das Filter aus dem Trichter, legt es auf einer Glasplatte völlig auseinander, und verteilt den noch überall stark feuchten Jodstickstoff mit Hilfe eines Hornspatels auf

Fig. 3152.



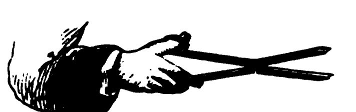
der einen Halbkreisfläche. Hierauf deckt man die andere Filterhälfte darüber, drückt sie mit der Hand fest und zerschneidet mit der Schere das Filter in etwa 2 bis 3 qcm große Stückchen. Diese sind sofort auf eine große Papiertrommel zu legen, die man durch Bespannen eines 30 bis 40 cm Durchmesser besitzenden, metallenen Topfes oder Kessels mit Fließpapier hergestellt hat (Fig. 3152).

Es ist wesentlich, daß die einzelnen, den Jodstickstoff enthaltenden Filterstückchen sich nirgends berühren, sondern möglichst weit voneinder auf der Trommel verteilt sind. Letztere wird nun im Vorlesungssaal an einem Ort aufgestellt, wo kein Unberufener in die Nähe kommt; eine durch ein Brett abgesperrte Ecke des Saales wird sich am besten hierzu eignen.

Über Nacht trocknet der Jodstickstoff vollständig aus und man muß daher am anderen Tage vermeiden, in seiner Nähe durch Türzuschlagen u. s. w. heftige Erschütterungen hervorzubringen, damit er nicht vorzeitig explodiert."

„2. Verpuffung des Jodstickstoffs. Um die einzelnen Filterstückchen von der Papiertrommel, welche nicht bewegt werden darf, abheben zu können, ohne daß Explosion eintritt, ist eine metallene Zange (oder eine Tiegelzange der gewöhnlichen Form), Fig. 3153, am geeignetsten, wenn deren Enden zugeschärft sind. Mit etwas sicherer Hand kann man ohne jegliches Risiko ein Filterstückchen nach dem anderen mit einer solchen Zange wegnehmen.

Fig. 3153.



Die äußerst leichte Verpuffung des Jodstickstoffs läßt sich am besten in der Weise zeigen, daß man eins jener Papierstückchen $1/_2$ m hoch über einer Tischplatte herabfallen läßt. Sowie es den Tisch berührt, tritt Explosion mit lautem Knall und dichten braunen und violetten Dämpfen ein.

Ist es gelungen, ein Filterstückchen auf den Tisch zu legen, so kann man es einfach durch Betupfen mit dem Finger zur Verpuffung bringen.

Wird ein Jodstickstoff enthaltendes Papierchen über oder in eine Gasflamme gehalten, so erlischt diese bei der Explosion.

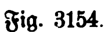
Berührt man schließlich die noch auf der Papiertrommel befindlichen Filterstückchen von oben mit der Zange, so explodieren sie und schlagen Löcher in das gespannte Papier.

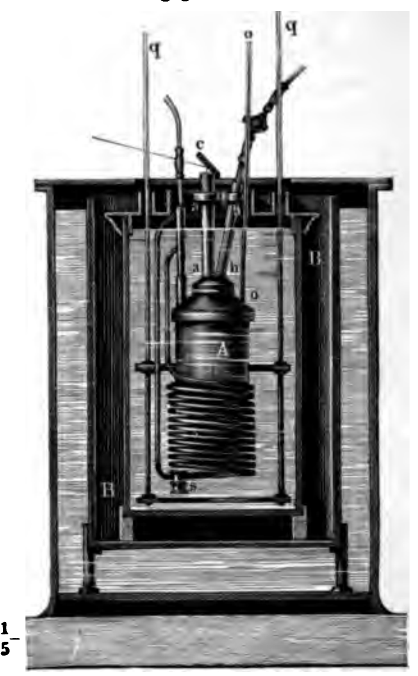
Konnte das angegebene, sehr bewährte Verfahren nicht mehr rechtzeitig ausgeführt werden, so dient als Notbehelf, daß man die Filterstückchen auf einem Brett in der Nähe des geheizten Ofens während der Vorlesung selbst trocknen läßt, wo sie dann meist von selbst explodieren, oder daß man sie noch feucht auf eine Metallplatte legt, welche über ein erhitztes Wasserbad gedeckt ist."

491. Brisanz der Sprengstoffe. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Explosion, welche bedingt ist durch den Einfluß der Reaktionswärme und des durch die Reaktion entstehenden Druckes auf die Reaktionsgeschwindigkeit ist von wesentlichem Einfluß auf die zerstörende Kraft (Brisanz) der Sprengstoffe. Je größer sie ist, um so rascher steigt der Druck an, um so leichter werden Zugspannungen erreicht, welche die Kohäsion der zu sprengenden Masse übertreffen.

Zur Demonstration der Fortpflanzungsgeschwindigkeit benutze ich eine etwa 12 m lange, 3 bis 4 cm weite Leitung aus Glasröhren, welche mit explosibler Grubengas-Luftmischung gefüllt ist. Beim Anzünden an einem Ende kann man das Fortschreiten der etwa 0,3 m langen Flamme leicht verfolgen.

492. Verbrennungswärme. Zur Messung der Verbrennungswärme von Leuchtgas benutze ich eine große Schale von emailliertem Blech, welche auf einen kleinen Gasherd gesetzt wird. Letzterem wird das Gas zugeleitet aus einem Glockengasometer, welcher 118 Liter faßt. Die Schale wird mit 14 kg Wasser gefüllt. Die Temperaturerhöhung beträgt 23°. Hieraus ergibt sich die Wärmeentwickelung beim Verbrennen von 1 kg Leuchtgas zu rund 5000 Kalorien[1]). In ähnlicher Weise könnte man die Verbrennungswärme von Spiritus (mit einer Spirituslampe), Petroleum (Petroleumkocher) und von Holzkohlen (Kohlenrost) bestimmen. Auch das Eiskalorimeter eignet sich gut zu diesen Messungen.


Fig. 3154.



Rumford (1813) bediente sich des in Fig. 3158 abgebildeten Apparates, der ebenfalls als Demonstrationsapparat verwendbar ist.

Beispielsweise beträgt die Zahl (großer Kalorien) bei Verbrennung von 1 kg

Wasserstoffgas	34 400
Leuchtgas	5 200
Absolutem Alkohol	6 960
Holzkohle	7 290
Steinkohle	8 000
Petroleum	11 040
Rüböl	9 310
Talg	8 370.

Fig. 3155.

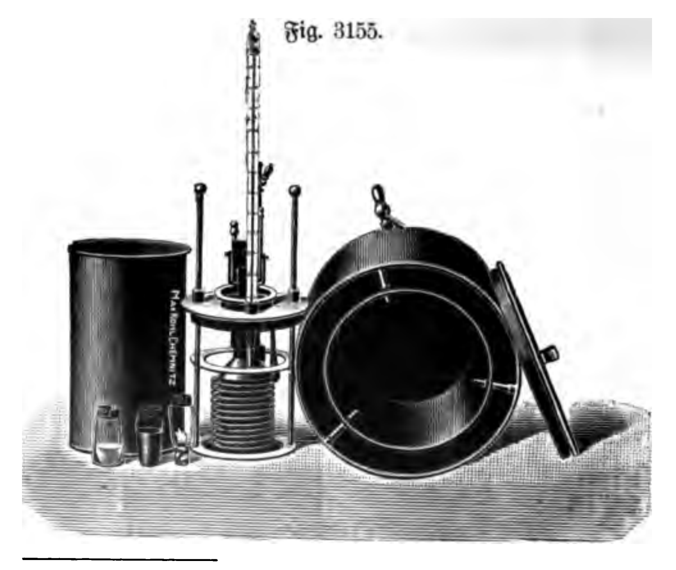
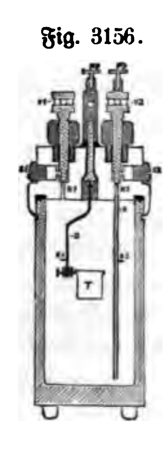
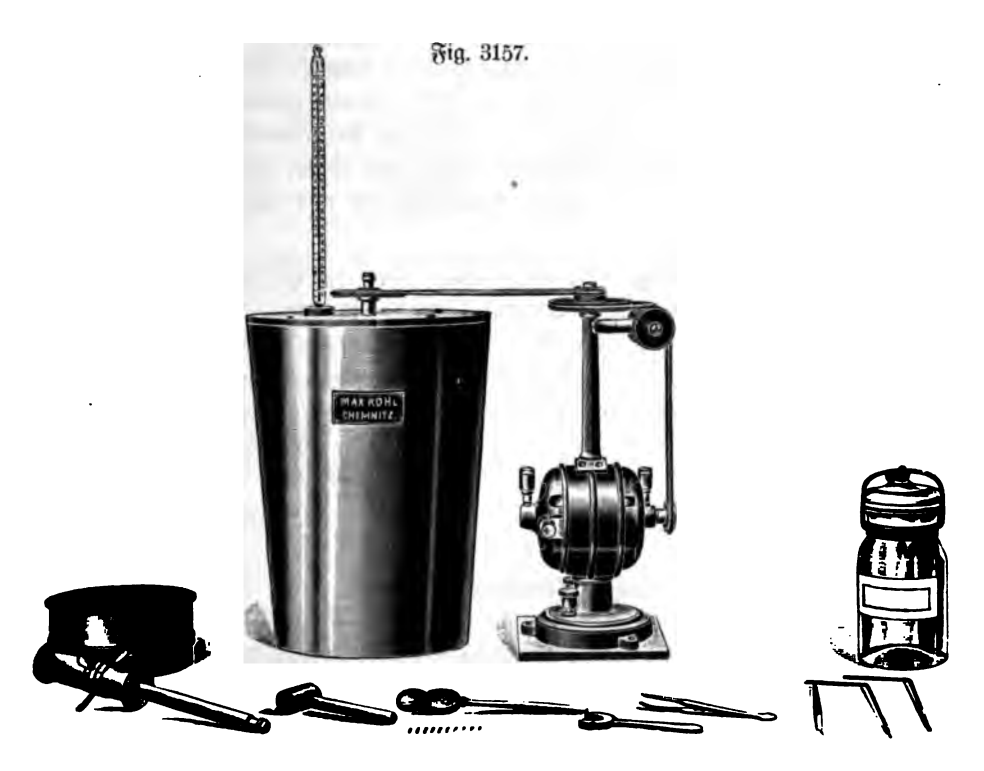


Fig. 3156.



[1]) Ein Kalorimeter zur Bestimmung von Verbrennungswärmen nach Fig. 3154 ist zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln zu 165 Mk.; ein solches nach Fig. 3155 von Max Kohl in Chemnitz zu 165 Mk. Verbrennungsbomben nach Berthelot-Mahler-Krocker, bei welchen auch der Wassergehalt des Brennmaterials und die zu seiner Ver-

Fig. 3157.

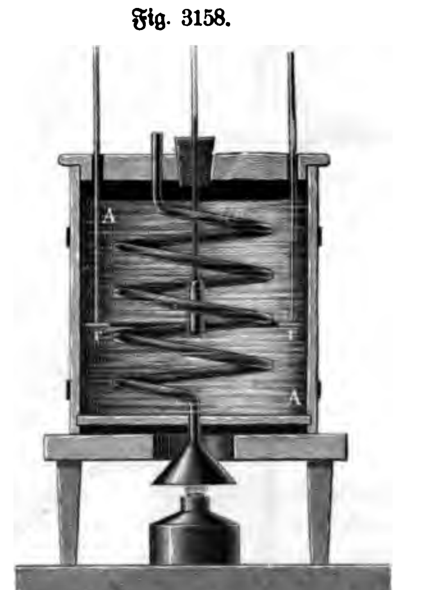


Genauere Werte von Verbindungswärmen bezogen auf Grammmoleküle und kleine Kalorien enthalten die nachstehenden thermochemischen Gleichungen [1]) (vgl. S. 1175):

$$2H + O = H_2O \text{ (flüssig)} + 67520$$
$$C \text{ Diamant} + 2O = CO_2 + 94300$$
$$C \text{ Diamant} + O = CO + 26600$$
$$S \text{ (rhombisch)} + 2O = SO_2 + 71080$$
$$H + J \text{ fest} = HJ - 6100$$
$$N + O = NO - 21600$$
$$K + Cl = KCl + 105600.$$

Die Zahlen bedeuten nicht, wie man annehmen könnte, die Wärme, die bei der direkten

Fig. 3158.



dampfung erforderliche Wärme berücksichtigt werden kann, liefert J. Peters, Werkst. f. wissensch. Instr., Berlin NW., Thurmstr. 4, für sich allein zu 270 Mk., mit Kalorimeter zu 400 bis 1050 Mk. Die Bombe, Fig. 3156, besteht aus Gußstahl und vermag einen hohen Druck auszuhalten. Die Kohle befindet sich in einem Platinnäpfchen und wird durch einen elektrischen Strom entzündet, nachdem die Bombe mit komprimiertem Sauerstoff gefüllt ist. Dieselbe befindet sich in einem Wasserkalorimeter, welches zum Schutze gegen Ausstrahlung der Wärme von einem tönernen Gefäß umgeben ist. Ein Brennwertmesser ist zu beziehen von Junkers u. Co., Dessau; ein solcher nach Parr (Fig. 3157) von Max Kohl, Chemnitz, zu 290 Mk.

[1]) Dieselben gelten für konstantes Volumen. Kann sich das Gas ausdehnen oder zusammenziehen, so sind noch Expansionskälte bezw. Kompressionswärme in Betracht zu ziehen

Vereinigung der Atome entsteht, sondern nur die Verbindungswärme von Mengen in Grammen, die im Verhältnis der Atomgewichte stehen. Da die Atome in der Regel zu Molekülen vereinigt sind, also zunächst getrennt werden müssen, und zur Auflösung der Moleküle in Atome eine beträchtliche Wärmemenge verbraucht wird, die größer sein kann als die Bildungswärme der neuen Verbindung aus den Atomen, ist erklärlich, daß die gesamte Wärmetönung auch negativ ausfallen kann (endotherme Reaktionen).

493. Selbsterwärmung. Radiumsalze haben die eigentümliche Eigenschaft, beständig Wärme zu produzieren, ohne dabei irgend eine merkliche Änderung zu erfahren. Die Wärme, welche 1 kg Radium stündlich erzeugt, ist ausreichend, 1 kg Wasser von Zimmertemperatur zum Sieden zu erhitzen. Man vermutet, daß es sich dabei um einen Zerfall der Atome handelt, der wie endotherme Prozesse zu Wärmeentbindung im Fall der Zersetzung Anlaß gibt. Es wird in der Tat ein eigentümliches Gas fortwährend entbunden, welches schließlich in Helium übergeht, so daß ein in ein Glasröhrchen eingeschmolzenes Radiumpräparat schließlich durch die fortgesetzte Gasentwickelung seine Hülle sprengen müßte.

494. Dissoziationswärme, Flammentemperatur. Die Flammentemperatur ergibt sich im Prinzip aus der Verbrennungswärme und der spezifischen Wärme des Verbrennungsproduktes. Die Berechnung setzt aber voraus, daß die Verbrennung eine vollständige sei, was im allgemeinen nicht zutrifft. Infolge der Dissoziation ist vielmehr die Temperatur oft bedeutend niedriger als die berechnete, da die Umwandlungstemperatur nicht überschritten werden kann. Z. B. wird bei Verbindung von Wasserstoff mit Sauerstoff von den beiden gleichzeitig stattfindenden Reaktionen, Verbrennung des Wasserstoffs und Zersetzung des Wasserdampfs in höherer Temperatur, die letztere vorherrschend. Bei der Umwandlungstemperatur halten sich beide gerade das Gleichgewicht, diese kann also nicht überschritten werden.

Fig. 3159.

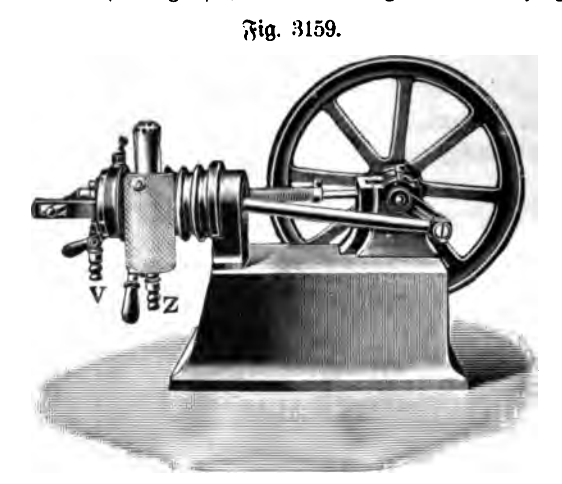
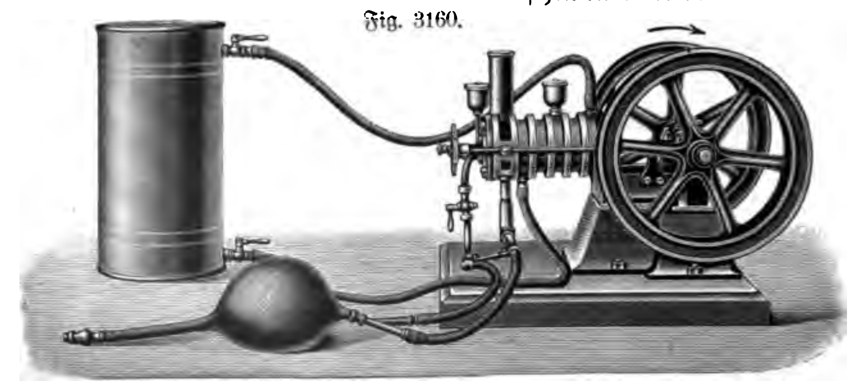


Fig. 3160.



495. Gasmotorenmodelle. Ein explosives Gemisch von Leuchtgas und Luft wird durch einen elektrischen Funken oder ein kleines Flämmchen entzündet und bewirkt durch die dadurch hervorgerufene Druckerhöhung die Verschiebung des Kolbens in den Cylinder, in welchem es sich befindet. Beim Zurückgehen des Kolbens werden die entstandenen Verbrennungsprodukte von diesem aus dem Cylinder hinausgeschoben und bei der Vorwärtsbewegung wieder eine kleine Quantität Knallgas eingesogen und alsbald zur Explosion gebracht, worauf sich dann das Spiel der Maschine wiederholt. Einige Modelle sind dargestellt in den Fig. 3159 (Lb, 30); 3160 (Lb, 40); 3161 (Lb, 30).

Fig. 3161.



Da ihre Einrichtung im Prinzip der der Dampfmaschine übereinstimmt, braucht man sich dabei nicht aufzuhalten, um so weniger als sie hier nur als statische Maschinen in Betracht kommen.

Schießpulvermaschinen, Benzin-, Petroleum- und Spiritusmotoren sind wohl von theoretischem bezw. praktischem Interesse, eignen sich aber weniger für Demonstration und lehren nicht mehr als Gasmotoren[1]). (Vergl. Kap. 11.)

Neuntes Kapitel.

Dynamik.

496. Gleichförmige Bewegung. Die Geschwindigkeit ist das Verhältnis des Weges, welchen der Körper zurücklegt, zur Zeit, welche er zu dieser Zurücklegung gebraucht. Bezeichnet man also mit s den durchlaufenen Weg, mit t die dazu gebrauchte Zeit und mit c die Geschwindigkeit, so ist:

$$c = s : t, \qquad s = c \cdot t,$$

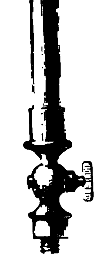
d. h. bei gleichförmiger Bewegung findet man den zurückgelegten Weg, wenn man die Zeit, welche zur Zurücklegung erforderlich ist, mit der Geschwindigkeit multipliziert. Meist wählt man die Sekunde zur Zeiteinheit und das Meter zur Längeneinheit[2]). Ein ausgewachsener Mensch geht z. B. mit einer Geschwindigkeit von 0,75 m/sec, ein Durchschnittsradler fährt mit der Geschwindig-

---

[1]) Kleine Gasmotoren liefert auch H. Raab, Zeitz. — [2]) Für die Geschwindigkeit 1 cm/sec sind die Bezeichnungen: Kin (s. Dressel, Lehrb. d. Physik, Freiburg i./B. 1895, Herder, S. 42) und Cel (s. v. Oettingen, Beibl. 21, 681, 1897) vorgeschlagen worden (vgl. auch § 64, S. 733, dort ist durch Versehen Cel statt Gal gesetzt).

keit 5, ein Rennpferd erreicht 16, ein Hase 18, ein Windhund 23, Personenzug 25, Schnellbahn 58 m/sec [1]).

Fig. 3162.



Zur Demonstration eignet sich die Messung der Geschwindigkeit eines auf der nahezu horizontal gestellten, zur Kompensation der Reibung schwach geneigten Fallrinne mit Geleise sich bewegenden Wagens.

497. Gleichförmig beschleunigte Bewegung. Die Gesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung sind bereits oben S. 729 behandelt worden [2]). Es ergaben sich die drei wichtigen Formeln $v = g.t$; $s = \frac{gt^2}{2}$ und $p = m.g$. Durch Kombination derselben erhält man weiter

$$v = \sqrt{\frac{2ps}{m}} = \sqrt{2gs}.$$

Die erzielte Geschwindigkeit ist also keineswegs, wie ehemals Aristoteles annahm, direkt der Strecke s, längs welcher die Kraft gewirkt hat, proportional, sondern der Wurzel aus derselben, auch ist nicht gemäß der Ansicht von Aristoteles die Fallbeschleunigung dem Gewicht proportional, sondern davon unabhängig.

Anscheinend widerspricht diesem Ergebnis, daß ein Stückchen Papier, eine Flaumfeder u. s. w. langsamer zur Erde fällt als ein Stein. Die Ursache dieses Unterschiedes ist indes nur in dem Widerstande der Luft zu suchen; im luftleeren Raume fallen beide gleich schnell.

Man kann dies mittels der Fallröhre, Fig. 3162, auf folgende Weise zeigen.

Die Fallröhre ist eine Glasröhre von ungefähr 3 cm Durchmesser und 150 bis 200 cm Länge, welche oben und unten mit einer Messingfassung luftdicht zugekittet ist. Die untere Fassung enthält einen Hahn und kann auf die Luftpumpe aufgeschraubt werden. In der Röhre befindet sich ein etwas großes Schrotkorn und eine Papierscheibe von ungefähr 12 mm Durchmesser. Wenn nun die Röhre, nachdem sie luftleer gemacht worden ist, vertikal gehalten und dann rasch umgekehrt wird, so fällt das Papierstück gleich schnell wie das Bleikügelchen, was nicht der Fall ist, wenn sie noch Luft enthält.

Ausführlicher als früher zeigt man zunächst (etwa mit der Fallrinne), daß die Endgeschwindigkeit v nach der Zeit t sich aus der Endgeschwindigkeit nach der ersten Sekunde (Beschleunigung) g ergibt nach der Formel: $v = g.t$; sodann, daß der in der ersten Sekunde zurückgelegte Weg = dem arithmetischen Mittel von Anfangs- und Endgeschwindigkeit = der Hälfte der Beschleunigung $= \frac{g}{2}$, der in der zweiten Sekunde $= \frac{3g}{2}$, in der dritten Sekunde $\frac{5g}{2}$ u. s. w., der nach t Sekunden zurückgelegte Weg somit $s = \frac{g.t^2}{2}$ sein muß.

[1]) Eine Zusammenstellung von Geschwindigkeiten gibt J. Olshausen, Geschwindigkeiten in der organischen und anorganischen Welt, Hamburg 1903, Boysen u. Maasch. — [2]) Als Bezeichnung für die CGS-Einheit der Beschleunigung 1 Cel/Sec schlägt v. Oettingen (a. a. O.) das Wort „Gal" vor.

Um zu zeigen, daß diese Gesetze nicht nur für die Fallbewegung, sondern allgemein gültig sind, kann man die Beschleunigung eines Wagens auf horizontaler Bahn durch konstante Kraft demonstrieren. Ich benutze hierzu das bereits Seite 729 erwähnte 4 m lange Schienengeleise. Die Bewegung des mit einem schweren Bleigewicht belasteten Wagens wird hervorgerufen durch eine über Rollen geführte, am Ende mit einem Gewicht belastete Schnur (Fig. 3163).

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit könnte man ebenso verfahren, wie bei den Fallversuchen, indem man die Kraft gerade eine Sekunde lang einwirken läßt, was sich in der Weise bewerkstelligen läßt, daß man das ziehende Gewicht nach Ablauf einer Sekunde durch ein untergesetztes Stativ abfängt, oder einfacher, indem man bei konstant wirkender Kraft die nach ein, zwei, drei Sekunden durchlaufenen Wege mißt und hieraus unter Benutzung der beiden ersten der obigen Formeln zunächst g und daraus r ableitet.

Damit nachgewiesen werden kann, daß auch das dritte Gesetz zutrifft, d. h. daß sich die erzeugte Geschwindigkeit verdoppelt oder verdreifacht, wenn die treibende Kraft sich verdoppelt oder verdreifacht, wird unmittelbar am Wagen eine Federwage angebracht [1]), was allerdings voraussetzt, daß die Masse des Wagens im Verhältnis zu dem treibenden Gewicht so groß ist, daß die erzeugte Beschleunigung die Ablesung nicht unmöglich macht.

Es wird gezeigt, daß, wenn man das Gewicht des Wagens verdoppelt oder verdreifacht, während der von der Federwage angezeigte Zug derselbe bleibt, auch die erzielte Geschwindigkeit (Beschleunigung) sich ändert und zwar umgekehrt proportional; daß sie also die Hälfte, ein Drittel u. s. w. des früheren Wertes annimmt.

Für Versuche in kleineren Dimensionen erscheint der nach gleichem Prinzip eingerichtete Apparat von Hartl (Z. 7, 278, 1894) geeignet, welcher aus dem oben (S. 712) erwähnten zur Demonstration der Gesetze der schiefen Ebene bestimmten Apparat durch Zufügen von Stativen und anderen kleinen Änderungen gewonnen wird (Fig. 3164 a).

Zum Abnehmen des Gewichtes dient dabei wie bei der Schober-Atwoodschen Fallmaschine ein an dem vertikalen Teile befestigter Ring, wie aus der Figur zu ersehen.

Zur Messung der treibenden Kraft verwendet Hartl (Z. 9, 219, 1896) eine auf dem Wagen befestigte Federwage F (Fig. 3164 b), welche ihre Schwingungen aufzeichnet auf einer drehbaren Scheibe D, die bei der Bewegung des Wagens umläuft, weil eine um ihren Rand gewickelte am Ende befestigte Schnur sie in Drehung versetzt.

Hrabowski (Z. 9, 24, 1896) konstruierte den Apparat Fig. 3165 und 3166 [2]). Die Spannung wird dabei selbsttätig auf einer berußten Milchglastafel durch einen Schreibstift aufgezeichnet.

Der Apparat besteht aus einem Wagen w, der auf einer Schiene ss_1 von 80 cm Länge sich leicht bewegen läßt, das Gewicht Q und das Dynamometer d

[1]) Man kann schon hier darauf hinweisen, daß nicht etwa die Schwere des treibenden Gewichtes ohne weiteres die treibende Kraft darstellt, die auf den Wagen allein wirkt, insofern ja auch die Masse des Gewichtes in beschleunigte Bewegung versetzt werden muß, somit die auf den Wagen wirkende Kraft nur ein Teil des treibenden Gewichtes sein kann. — [2]) Zu beziehen von Sommer u. Runge in Berlin SW., Wilhelmstraße 122, zu 80 Mk.

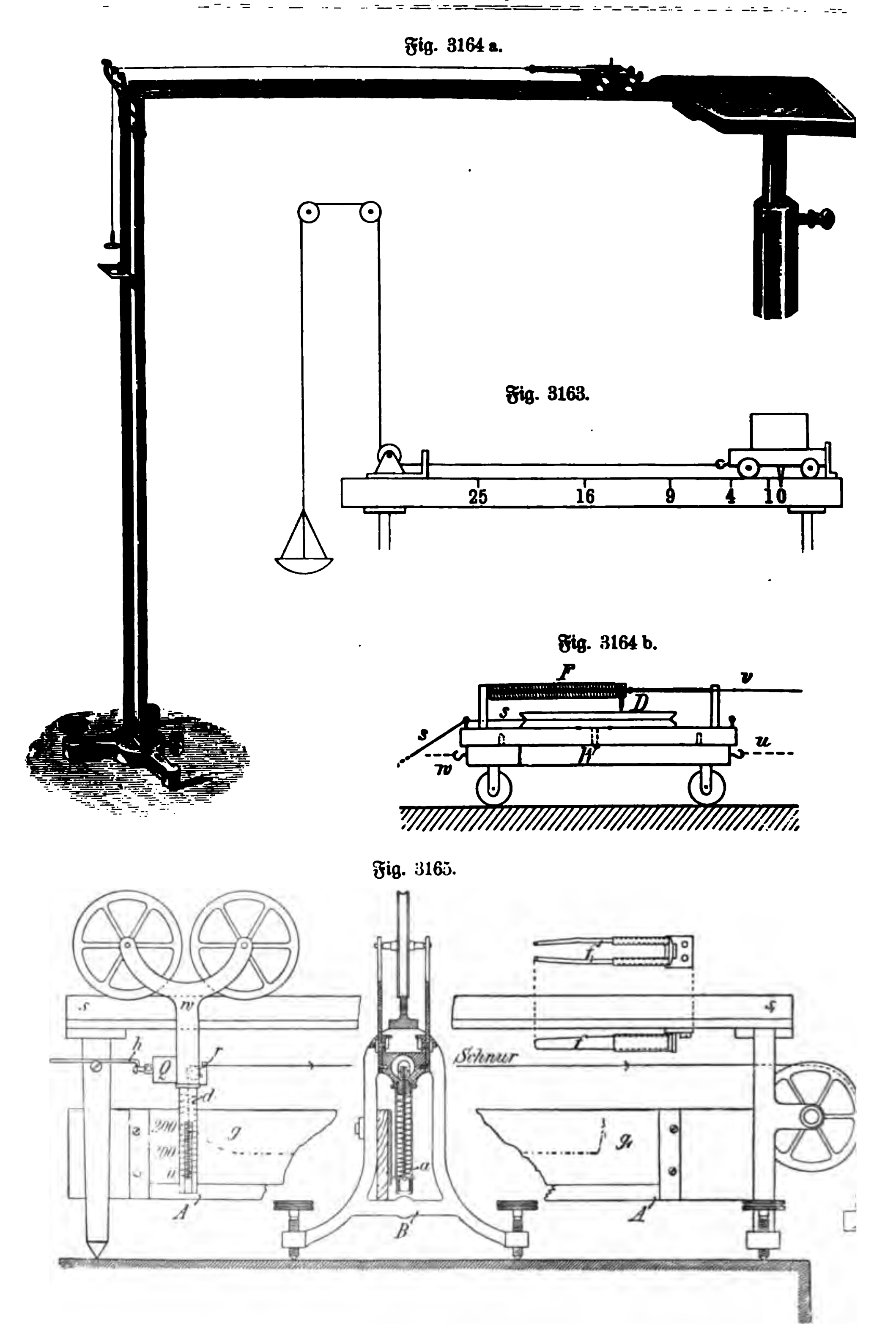


Fig. 3164 a.

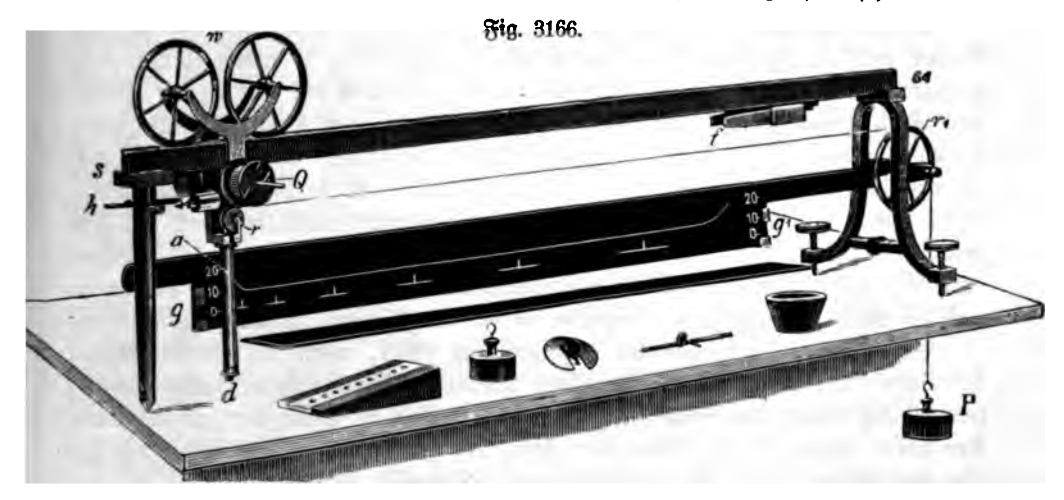
Fig. 3163.

Fig. 3164 b.

Fig. 3165.

trägt. Eine Schnur, mittels welcher der Wagen von dem Gewichte P gezogen wird, läuft über die Rollen $r r_1$ und ist mit einem Ende der Dynamometerfeder verbunden. An demselben Ende der Dynamometerfeder befindet sich ein Schreibstift a, welcher während der Fahrt des Wagens auf einer berußten Glastafel $g g_1$ eine Kurve beschreibt. Der Haken h dient zum Festhalten des Wagens und die gabelförmige Feder f zum Auffangen desselben. Zur Verhinderung der Oszillation ist eine justierbare Auslaßfeder (auf der Figur nicht sichtbar) oberhalb des Auslösehakens h angeordnet. Wenn der Wagen festgehalten wird, so zeigt das Dynamometer die Größe des Gewichtes P an; die Spannung in der Schnur ist also $= P$. Wird der Wagen losgelassen und von dem Gewichte P fortbewegt, so beschreibt der

Fig. 3166.



Stift a auf der Tafel eine Kurve, aus deren Höhe zu ersehen ist, daß die Spannung während der beschleunigten Bewegung kleiner als P, und zwar $= \frac{P \cdot Q}{P + Q}$ war. Die nähere Erörterung dieser Beziehung gehört an eine spätere Stelle (vgl. S. 1321).

Ist bei diesen Versuchen die Masse des Wagens groß gegen die des treibenden Gewichtes, so ist die beschleunigende Kraft auf den Wagen nahezu konstant.

498. Ungleichförmig beschleunigte Bewegung. Ein Beispiel einer stark veränderlichen Kraft kann man in der Weise gewinnen, daß man den Wagen durch eine zusammengepreßte Spiralfeder in Bewegung versetzt. Während der Bewegung entspannt sich die Feder, die Kraft nimmt also vom Anfangswerte bis zu 0 ab, und die erzielte Endgeschwindigkeit wird ungefähr derjenigen gleichkommen, welche die Hälfte der Anfangsspannung in der gleichen Zeit hervorgebracht hätte. Auch eine Federbüchse[1]), ein Blasrohr (Windbüchse, Dampfkanone) oder eine gewöhnliche Pistole könnten hier erwähnt werden, insofern auch hier die Kraft während der Bewegung des Geschosses sich ändert. Die genauere Behandlung der letzteren setzt indes Kenntnis der Aerodynamik und Thermodynamik voraus.

499. Wirkung und Gegenwirkung. Wenn ein Arbeiter einen schweren Wagen auf einem horizontalen glatten Schienengeleise fortzuschieben versucht, so fühlt er

[1]) Eurekapistolen (Federbüchsen) liefern Mayer u. Grammelspacher in Rastatt. Sie sind aber auch in Spielwarenhandlungen zu haben.

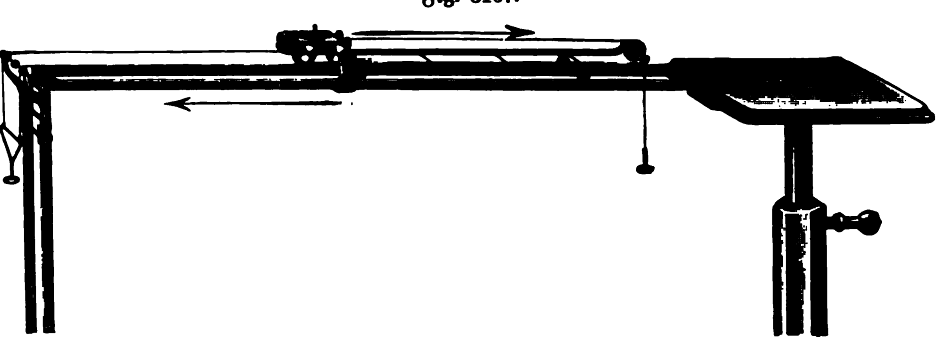
einen Widerstand, den sogenannten Trägheitswiderstand des Wagens. Je größere Geschwindigkeit er in gleicher Zeit hervorbringen will, um so mehr muß er sich anstrengen, um so größer ist aber auch der Gegendruck, den der Wagen ausübt.

Scheinbar ist dieser Trägheitswiderstand eine Kraft von gleicher Art, wie die treibende Kraft des Arbeiters. Man kann indes leicht erkennen, daß dies nicht der Fall ist. Er ist der Kraft des Arbeiters gleich und entgegengesetzt, müßte also dieser, falls er eine wahre Kraft wäre, das Gleichgewicht halten, was nicht zutrifft. Eine eigentliche Kraft hat immer zwei Angriffspunkte (Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung), an denen sie in entgegengesetzter Richtung wirkt, der Trägheitswiderstand hat dagegen nur einen Angriffspunkt. (Vgl. S. 665.)

Stände der Arbeiter statt auf dem Fußboden auf einem niedrigen leichten Karren, welcher sich auf dem gleichen Geleise bewegen kann, so würde es ihm nicht gelingen, den Wagen von der Stelle zu bringen, er würde nur den kleinen Karren mit seinen Füßen fortstoßen. Der Arbeiter wirkt nicht nur durch die Kraft seiner Arme, sondern auch durch den Druck der Füße. Diese suchen den Erdboden in entgegengesetzter Richtung zu verschieben wie den Wagen, und hätten wir feine Instrumente, welche ermöglichten zu untersuchen, ob der Arbeiter tatsächlich durch das Anstemmen der Füße gegen den Boden der Erde eine Geschwindigkeit mitteilt, so würde man dies bestätigt finden. Diese Geschwindigkeit ist allerdings nur sehr klein, weil die Masse der Erde (im Gegensatz zu der des leichten Karrens) sehr groß ist.

Sehr deutlich kann man die Gegenwirkung sehen, wenn ein kleiner Wagen auf einem größeren durch eine an beiden befestigte gespannte Feder, welche plötzlich (etwa durch Abbrennen eines Fadens) ausgelöst wird, in Bewegung gebracht wird. Der kleine Wagen bewegt sich in der einen, der große, auf dem er steht, mit geringerer Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung.

Fig. 3167.



Höfler (Z. 7, 279, 1894) benutzt den in Fig. 3167 dargestellten Apparat, bei welchem ein kleiner Wagen auf einem größeren durch ein sinkendes Gewicht in Bewegung gesetzt werden kann. (Prinzip der Erhaltung des Schwerpunkts.)

V. v. Lang (1883) benutzt (ähnlich wie schon Mach) den Elektromotor von Page. Er ist auf drei Räder gestellt und bewegt sich im gleichen Takte, wie sich der Eisenkern vor- und zurückschiebt, jeweils in entgegengesetztem Sinne hin und her. Durch Befestigung eines Gewichtes am Schwungrade kann diese oszillierende Bewegung kompensiert werden.

Einfacher kann man eine Person auf einen kleinen Wagen stellen und dieselbe ein schweres Gewicht verschieben lassen (Schaukel).

Andere einfache Vorrichtungen könnte man auch aus einer Windbüchse, einer Federbüchse, einer kleinen Kanone, wie sie als Spielzeug gebraucht werden, u. s. w. herstellen, wenn man dieselben auf Räder setzt. (Rückstoß).

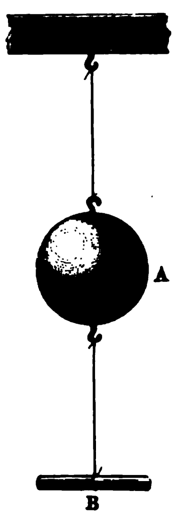
500. Trägheitswiderstand. Um nachzuweisen, daß immer, wenn ein Körper in Bewegung gesetzt wird, eine der Masse und Beschleunigung entsprechende Kraft vorhanden ist, kann man eine Federwage mit einem Gewichte belasten und nun dieselbe aufwärts oder abwärts bewegen. Dabei ändert sich die Angabe der Federwage, da die dem Trägheitswiderstand entsprechende Kraft zum Gewichte des Gewichtsstückes sich addiert oder davon subtrahiert. (Scheinbare Gewichtsabnahme einer Last, die eine Person in einem Fahrstuhl trägt, beim Niedergang desselben, Gewichtszunahme beim Aufstieg. Desgleichen beim Luftballon. Poggendorffs Wage (s. Fallmaschine, S. 1270).

Eine Trägheitskraft wird immer durch eine wahre Kraft erzeugt [1]) setzt also das Vorhandensein einer solchen voraus. Sie ist scheinbar mit der wahren Kraft im Gleichgewichte, in Wirklichkeit tritt erst Gleichgewicht ein, wenn man sie durch äquivalente wahre Kräfte, event. auch nur eine einzige ersetzt (Prinzip von d'Alembert).

Die Kraft eines Arbeiters, welcher einen Wagen schiebt, äußert sich, wie gezeigt, nach zwei Richtungen, insofern er einerseits dem Wagen, anderseits der Erde einen Bewegungsantrieb erteilt. Beiden Wirkungen stellen sich die Trägheitswiderstände entgegen, die aber nur je einen dieser Angriffspunkte haben. Würde man sie durch gleich große wahre Kräfte ersetzen, z. B. die Kräfte von zwei andern Arbeitern (oder von gespannten Federn), so würde keine Bewegung erfolgen.

Diese Arbeiter können aber keine Kraft ausüben, wenn sie sich nicht mit den Füßen gegen die Erde stemmen können und die Bewegung der Erde wird nur dadurch unmöglich, daß die Kohäsion eine Trennung der nach entgegengesetzten Richtungen bewegten Massen verhindert.

Fig. 3168.



Im Allgemeinen sind immer zahlreiche Kräfte hintereinandergeschaltet (vgl. S. 668). Kann eine der hintereinandergeschalteten wahren Kräfte nicht beliebig gesteigert werden, z. B. die Kohäsion eines Fadens, so tritt mit wachsender Beschleunigung, also steigendem Trägheitswiderstande, ein Bruch ein, ebenso wie wenn die Kraft wie bei den Festigkeitsversuchen durch eine andere größere Kraft überwunden würde.

Wird z. B. der oben benutzte Wagen an einem Faden langsam gezogen, so läuft er, wenn dagegen rasch, reißt der Faden ab.

Bindet man an einen schweren Körper einen so starken Faden, daß er den Körper noch tragen kann und zieht man langsam an dem Faden, so läßt sich der Körper heben, zieht man aber schnell, so wird der Faden reißen.

Wird bei der Anordnung Fig. 3168 (Lb, 5) rasch an dem Griff *B* gezogen, so reißt der untere Faden durch, da sich die Kugel *A* nicht bewegen und den oberen Faden stärker anspannen

[1]) Wenn diese nicht durch eine entgegenwirkende gleich große andere wahre Kraft kompensiert wird.

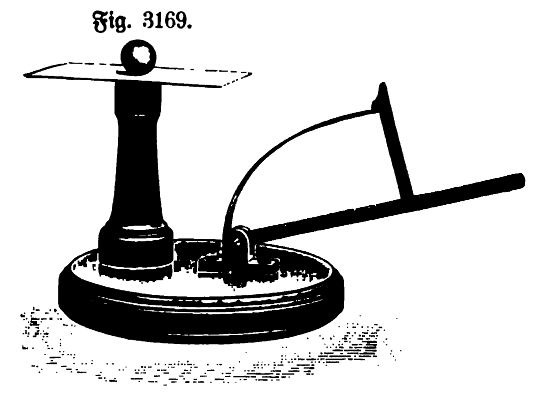
kann. Bei langsamem Ziehen reißt der obere Faden. **Weinhold** empfiehlt bei Anwendung von gewöhnlichem grauem Zwirn eine Bleikugel von 1 kg Gewicht. Ein ähnlicher Versuch ist das Zerschlagen eines von zwei Trinkgläsern unterstützten Holzstabes.

Ein schwerer aufgehängter Körper kann durch langsamen Druck mittels einer Talgkerze in Bewegung gesetzt werden; will man denselben aber dadurch in schnelle Bewegung setzen, so bricht die Kerze auseinander.

Wird eine Glasscheibe durchschossen, so entsteht ein rundes Loch; die Scheibe wird nicht, wie man erwarten könnte, zersplittert, da die innere Reibung im Glase unzureichend ist, die Bewegung auf eine ausgedehnte Fläche vor dem entstehenden Loche zu übertragen. Besonders auffällig wird der Versuch, wenn man die Glasscheibe an zwei Fäden aufhängt und z. B. durch Spiegelung eines Lichtstrahles zeigt, daß sie sich beim Durchschießen nicht im geringsten bewegt.

Eine **Nähnadel** läßt sich durch einen raschen Schlag **durch eine Kupfermünze** treiben, welche auf einer durchbohrten harten Unterlage auf einem Amboß liegt. Die (kurze) Nadel wird, um sie zu halten, durch einen Kork gesteckt.

Fig. 3169.



Legt man auf ein Glas mit etwa 3 bis 4 cm weiter Öffnung ein recht glattes neues Kartenblatt, darauf über der Öffnung eine Münze oder Kugel

Fig. 3170.



und schnellt nun mittels eines Fingers oder einer Feder (Fig. 3169 K, 17) das Kartenblatt weg, so fällt die Münze in das Glas, weil die Reibung geringer ist als die **Kraft**, welche erforderlich wäre, um der Münze während der Dauer der Berührung die gleiche Geschwindigkeit mitzuteilen, welche das Kartenblatt hat.

Schulze (1884) hat hierzu einen besonderen Apparat konstruiert, der in Fig. 3170 dargestellt ist. Derselbe besteht aus einer Schienenbahn, einem vierrädrigen Wagen und einer Achse mit einem Radpaare (zweirädrige Walze). Zieht man an dem Wagen, so bewegt sich die Walze relativ zu demselben. Markiert man ihre frühere Lage durch einen daneben aufgestellten Stab u. dergl., so zeigt sich, daß sie tatsächlich in Ruhe bleibt und nur der Wagen sich bewegt. Hält man den bewegten Wagen an, so rollt die Walze auf ihm weiter, und ähnlich bei Verminderung der Geschwindigkeit. Gibt man dem bewegten Wagen, von dem der hintere Anschlagwinkel entfernt ist, von hinten her einen Stoß, so rollt die Walze hinten herunter und läuft dem Wagen nach. Statt der Walze können auch Puppen auf den Wagen gestellt werden, um zu zeigen, welche unfreiwilligen Bewegungen **Menschen** in Fahrzeugen ausführen, wenn sich die Geschwindigkeit ändert [1]).

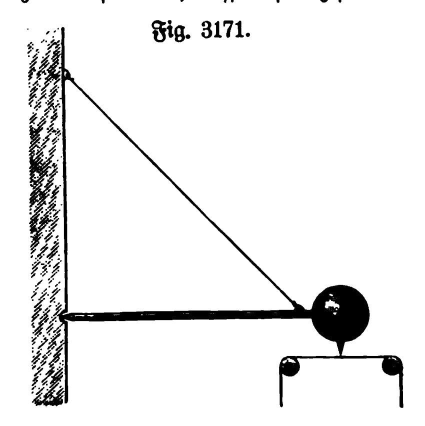
---

[1]) In Wirklichkeit erfolgt der Sturz häufig gerade entgegengesetzt, indem der Mensch, durch Erfahrung belehrt, demselben durch eine übermäßige entgegenwirkende Kraft zuvorzukommen sucht.

Kompliziertere Erscheinungen erhält man bei Anwendung plastischer Körper, doch kann hier nur darauf hingewiesen werden[1]).

501. Seismometer sind Instrumente zur Beobachtung von Erschütterungen und Erdbeben. Meist gebraucht wird das Horizontalpendel, dessen Prinzip etwa durch die einfache Vorrichtung Fig. 3171 demonstriert werden kann. Die Spitze der Pendelstange stützt sich gegen die Mauer, das andere Ende ist an der schrägen Schnur befestigt. Bei Schwankungen der Wand um eine vertikale Achse bleibt die Pendellinse stehen und verzeichnet die Schwankungen auf dem über die Rollen geführten Papierstreifen.

Fig. 3171.

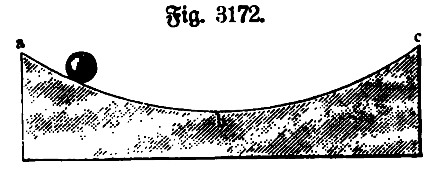


502. Fall auf gewundener Bahn. Beim Fall auf der schiefen Ebene ist die Beschleunigung im Verhältnis der Höhe zur Länge kleiner, der Fallraum aber bei gleicher Höhe im gleichen Maße größer, so daß die Endgeschwindigkeit dieselbe ist, wie beim freien Fall. Gleiches gilt für eine beliebig gekrümmte, z. B. schraubenförmig gestaltete Bahn, da sich eine solche als Kombination unendlich vieler schiefer Ebenen betrachten läßt[2]).

Die erzielte Endgeschwindigkeit ist also unter allen Umständen die nämliche, wie die bei freiem Fall, nur ihre Richtung ist verschieden.

503. Verzögerte Bewegung. Gestaltet man die Bahn so, daß sie sich vom tiefsten Punkte an wieder aufwärts wendet, z. B. in Form eines Kreisbogens, so gilt immer noch derselbe Satz, daß die von der Schwere hervorgebrachte Beschleunigung unabhängig ist von dem bereits vorhandenen Bewegungszustande. Da sie entgegengesetzte Richtung hat wie die letztere, so wird die Bewegung eine verzögerte. Man wird auch ohne weiteres sagen können, daß die im tiefsten Punkte vorhandene Geschwindigkeit vollständig wieder entzogen sein wird, sobald der Körper die frühere Höhe erreicht hat, gleichgültig auf welcher Bahn. Zur Demonstration benutzt man zwei gleichgestaltete Fallrinnen, welche unter Zwischenfügung eines kurzen Bogenstückes mit entgegengesetzter Neigung aneinander gefügt werden, so daß die Kugel auf der einen Seite herunter-, auf der anderen hinaufrollt. Einfacher ist eine in Form eines Kreisbogens gestaltete Blechrinne, in welcher man eine Kugel hin- und herrollen läßt (Fig. 3172) oder ein Pendel. Ein komplizierterer Fall ist der einer aus zwei schraubenförmigen Rinnen zusammengesetzten Bahn. Die Steighöhe $s = \frac{v^2}{2g}$ er-

Fig. 3172.



[1]) S. Gray, Lehrb. d. Physik, deutsch, Braunschweig 1904, Vieweg u. Sohn, Bd. I, 376, § 347. — [2]) Eventuell kann man auch unter Anfügung einer horizontalen Bahn und Benutzung verschieden geneigter schiefen Ebenen oder gewundener Geleise zeigen, daß die Endgeschwindigkeit tatsächlich nur von der Fallhöhe abhängt.

gibt sich beispielsweise für eine mit 500 m/sec vertikal in die Höhe geschossene Kanonenkugel = 12740 m, also über $2^1/_2$ mal so groß als die Höhe des Montblanc. In Wirklichkeit würde dieselbe infolge des Luftwiderstandes wesentlich kleiner ausfallen, die Zahl gilt nur für den luftleeren Raum.

504. Bewegungsenergie. Bei dem eben besprochenen Experiment schafft sich der Körper vermöge seines Bewegungszustandes selbst wieder auf diejenige Höhe hinauf, aus welcher er herabgefallen ist. Man erkennt somit, daß der Bewegungszustand eine Form von Arbeitsvermögen oder Energie darstellt und daß der Größe nach diese Bewegungsenergie gerade gleich der potentiellen Energie sein muß, die der Körper beim Herunterfallen verlor, insofern sie ausreichend ist, ihn wieder genau auf dieselbe Höhe heraufzubefördern, also ebenfalls

$$= p.s \text{ oder } m \cdot \frac{g^2 . t^2}{2}, \text{ da } p = m.g \text{ und } s = \frac{g t^2}{2}.$$

Da ferner $v = g.t$, so ist das Maß der Bewegungsenergie $\frac{m v^2}{2}$.

Es ist hiernach möglich, die Bewegungsenergie lediglich durch die Masse und Geschwindigkeit des Körpers auszudrücken und da die potentielle Energie, welche aus der Bewegungsenergie hervorgehen kann, lediglich von diesen beiden Größen abhängt, so ist der obige Ausdruck in jedem Falle das Maß der kinetischen Energie, gleichgültig, auf welchem Wege dieselbe entstanden sein mag.

Die Einheiten zur Messung der Bewegungsenergie sind natürlich dieselben wie die für die potentielle Energie, technisch: kgm, absolut: Erg (Joule).

Es empfiehlt sich, verschiedene Beispiele vorzuführen. Ein bekanntes Spielzeug, welches hierzu dienen kann, ist die Federbüchse.

Höfler (Z. 9, 65, 1896) benutzt eine Federkanone (ähnlich wie Hartl), d. h. eine 18 cm lange Röhre mit einer Spiralfeder, die durch einen Zug von je 100 g um je 1 cm zusammengedrückt wird. Die Wurfhöhen bei vertikal aufwärts gerichteter Kanone verhalten sich wie 1:4:9:16:25, wenn der (aus Aluminium angefertigte) Leitstab durch Kräfte von 100, 200, 300, 400 500 g, um Strecken von 1, 2, 3, 4, 5 cm herausgezogen worden war (Fig. 3173 K, 6).

Fig. 3173.

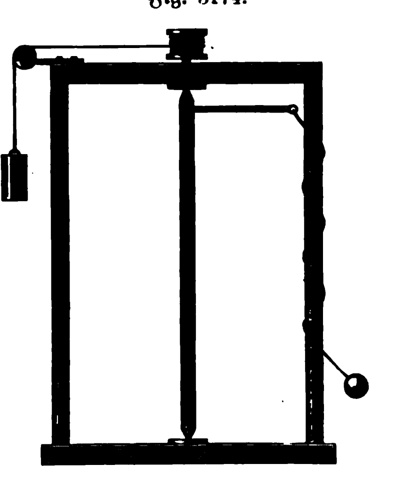


Maey (Z. 15, 268, 1902) läßt ein Gewicht auf eine Federwage fallen und bestimmt aus dem Betrage der Deformation der Feder die Größe der erzeugten Spannungsenergie, welche nahezu der verlorenen Bewegungsenergie gleich sein muß, um so mehr, je kleiner die Masse der Federwage, d. h. die beim Zusammenstoß in Wärme übergehende Energiemenge.

Weiter hierher gehörige Beispiele sind ein oscillierendes Schwungrad, welches mittels einer auf eine Trommel auflaufenden Schnur ein Gewicht hebt, zum Stillstand kommt, wenn seine Bewegungsenergie verbraucht ist, durch das Gewicht nun rückwärts gedreht wird, bis die Schnur abgelaufen ist, sodann das Gewicht wieder hebt u. s. w.; das analog wirkende Spielzeug „Joujou“ bestehend aus einer scheibenförmigen Spule mit aufgewickeltem Faden, welche man, während man das Ende des Fadens festhält, herabfallen läßt, worauf sie sich von selbst wieder an dem Faden heraufhaspelt u. s. w.; endlich das fliegende Pendel, dessen Prinzip durch die Vorrichtung Fig. 3174 dar-

gestellt ist. Die vertikale drehbare Achse hat oben einen horizontalen Arm, an dessen Ende ein Fadenpendel hängt. Wird die Achse durch das Gewicht links gedreht, so schlingt sich das Fadenpendel um eine der Säulen, wickelt sich wieder ab, wickelt sich auf die andere Säule, wickelt sich wieder ab u. s. w. in regelmäßigen Intervallen.

Fig. 3174.



Unter Umständen scheint es möglich zu sein, die kinetische Energie zu zerstören, z. B. durch Reibung. Die Aufklärung, daß nichtsdestoweniger auch in diesem Falle die Energie erhalten bleibt, kann erst später gegeben werden.

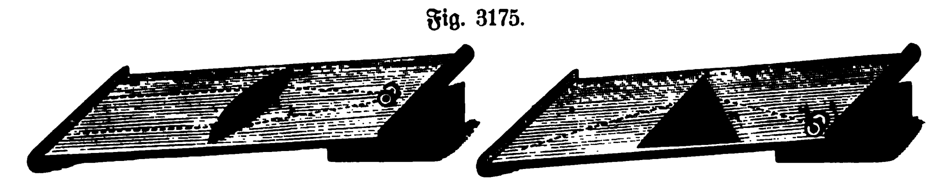
505. Verzögerung durch Reibung. Läßt man einen Wagen von dem geneigten Geleise auf ein genau horizontal gerichtetes übertreten, so behält er seine Geschwindigkeit nicht bei, sondern kommt nach Durchlaufen einer bestimmten Strecke (Bremsweg) zur Ruhe. Die Länge derselben ergibt sich aus der Gleichung $s = \frac{v^2}{2g}$, wenn g die durch die Reibung bedingte Verzögerung bedeutet.

Wird ein Wagen auf horizontaler Bahn, auf welcher Reibung vorhanden ist, durch eine konstante Kraft gezogen, so ergibt sich die Beschleunigung aus der Differenz von treibender Kraft und Reibung. Wächst letztere wie gewöhnlich, z. B. bei geschmierten Lagern für die Achsen mit der Geschwindigkeit, so wird schließlich die Bewegung gleichförmig (Eisenbahnzug), wie event. z. B. mit dem Wagen auf Geleise (S. 729) demonstriert werden kann.

Zuweilen benutze ich einen durch ein aufgeschraubtes Eisengewicht beschwerten Stahlstab, welchen man in vertikaler Stellung aus mehr oder minder großer Höhe in eine mit weichem Lehm gefüllte Kiste fallen läßt. Ist K der Widerstand des Lehms, l die Tiefe, bis zu welcher der Stab eindringt, G das Gewicht und s die Fallhöhe des Stabes, so ist $K l = G . s$. Beispielsweise war $K = 62{,}8$ kg, $G = 7{,}2$, $s = 2$ m. Hieraus folgt, falls man den Widerstand konstant annehmen kann, $l = 22{,}6$ cm. Tatsächlich wurde ungefähr diese Eindringungstiefe beobachtet.

506. Apparat zur Demonstration der Ablenkung durch Änderung der Geschwindigkeit des Fortschreitens (Fig. 3175). Dieser von Mach angegebene Apparat

Fig. 3175.



erscheint deshalb von besonderem Interesse, da er ermöglicht, Versuche auszuführen, welche vorbereiten auf später zu behandelnde analoge Erscheinungen in Akustik und Optik. Er besteht aus einem langen Brette, auf welchem in der Mitte einfache aus Samt ausgeschnittene Figuren aufgeklebt sind. Stellt man ein solches Brett

in geneigter Lage auf und läßt zwei auf gleicher Achse befestigte Rädchen längs desselben herunterrollen, so ändern diese ihre Bewegungsrichtung, sowie sie auf die Samtfläche auftreffen oder dieselbe wieder verlassen. (S, 28, zwei mit verschiedenen Figuren beklebte Bretter.)

Ein bekanntes Spielzeug, welches hier erwähnt werden kann, ist das Uhrglas mit Puppe auf Spiegel. Bringt man einen Wassertropfen darunter und neigt die Glasplatte langsam hin und her, so kommt es bald in eine kreisende und gleichzeitig fortschreitende Bewegung infolge der ungleichmäßigen Reibungs- und Adhäsionswiderstände.

507. Relative und absolute Bewegung. Die Trägheitskräfte unterscheiden sich von wahren Kräften auch dadurch, daß sie eine bestimmte Richtung im Raume haben, während sich die Achse wahrer Kräfte beliebig verschieben läßt. Ein Körper, welcher sich mit großer Geschwindigkeit im Raume bewegt, wird durch eine kleine Kraft nicht in der Richtung ihrer Achse in Bewegung gesetzt. Wir könnten hiernach scheinbar ermitteln, ob sich ein Körper in absoluter oder nur in relativer Ruhe befindet. In Wirklichkeit ist dies nicht möglich, da wir keinen absolut festen Punkt im Raume kennen.

Beispielsweise ist ein auf der Erde ruhender Felsblock scheinbar in absoluter Ruhe, tatsächlich besitzt er aber Bewegungsenergie, indem er sich mit ungeheurer Geschwindigkeit mit der ganzen Erde im Weltraume fortbewegt. Absolute Ruhe setzt voraus, daß die Bewegungsenergie gleich Null sei. Man ist hiernach berechtigt, von absoluter Ruhe zu sprechen, obschon wir kein Mittel haben, sie nachzuweisen.

Ein Beobachter im Innern eines fahrenden Schiffes oder Eisenbahnwaggons täuscht sich über den Bewegungszustand. Er kann nichtsdestoweniger denselben bestimmen, wenn z. B. von außen quer durch den Wagen eine Kugel geschossen wird, infolge der **Aberration** der durch die Löcher gezogenen Linie von der Richtung des bewegten Geschosses. Natürlich wird auf diesem Wege nur die Bewegung relativ zur Erde erkannt.

Fig. 3176.



Die Abweichung der Fallrichtung eines Körpers von der Lotlinie ist dadurch bedingt, daß der Körper in der hohen Anfangslage eine größere horizontale Geschwindigkeit besitzt als der Erdboden.

Derartige Beobachtungen ermöglichen in der Tat, den wirklichen Bewegungszustand der Erde, den wir direkt nicht wahrnehmen können, weil wir uns mit ihr bewegen, zu erkennen.

Donle (Z. 5, 203, 1892) benutzt zur Erläuterung eine Reißschiene, verschiebt deren Anschlagstück mit der linken Hand und die Kreide längs des Lineals mit der rechten.

Ein Universalapparat, im wesentlichen nach dem Prinzip des Flugwerkes (S. 718, § 54) eingerichtet, zur Demonstration der durch Kombination einer geradlinigen mit einer beliebigen anderen Bewegung resultierenden Bahn eines Körpers, also insbesondere auch zur Darstellung von Wellenkurven, ist der Kinegraph von v. Engelmeyer (zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln für 60 Mk., Fig. 3176). Er besteht aus einer Tafel, auf welche durch eine in der Kugel E angebrachte Kreide die gewünschte Kurve aufgezeichnet wird, während man den Wagen BB' auf der oberen Kante der Tafel fortrollt. Dabei wickelt sich die Schnur G, an welcher die Kugel E befestigt ist, z. B. auf eine Trommel oder einen Konus auf oder wird durch einen Exzenter auf- und abbewegt [1]).

Fig. 3177.

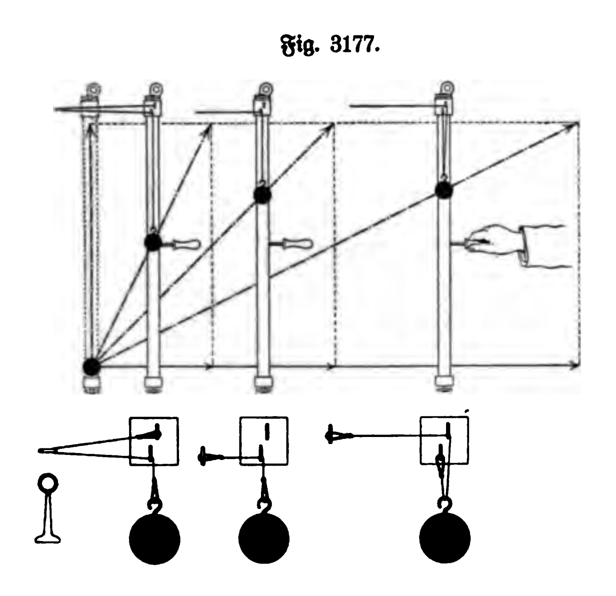


Fig. 3178.



508. Zusammensetzung von Bewegungen. Da sich nach dem Parallelogrammgesetz Kräfte in ihren Wirkungen gegenseitig nicht stören, die Kraftwirkung aber in Erzeugung von Bewegung besteht, folgt allgemein, daß auch Bewegungen sich gegenseitig nicht stören, sondern nach dem Parallelogrammgesetz zusammensetzen.

Löwy demonstriert die Tatsache, daß ein horizontal geworfener Körper in einer bestimmten Zeit dieselbe vertikale Höhe durchfällt wie ein einfach fallender mittels des Apparates Fig. 3178 (Lb, 17).

Shaw (Z. 9, 138, 1896) modifiziert den Versuch in der Art (Fig. 3179), daß er zwei Kugeln auf eine Visitenkarte legt, die auf zwei in den Rand des Tisches horizontal eingesteckten Stecknadeln ruht. Wird die eine, etwa mittels eines Stahlbandes, fortgeschleudert, so fällt notwendig auch die andere herunter und beide erreichen gleichzeitig den Boden.

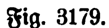
[1]) Einen einfacheren, ebenfalls nach dem Prinzip der Flugmaschine wirkenden Apparat nach Hartl, zum Nachweis des Bewegungsparallelogramms nach Fig. 3177 liefern W. J. Rohrbecks Nachf., Wien I, Kärntnerstr. 59, zu 25 Kronen. Über eine andere hierher gehörige Vorrichtung siehe Czermak, Z. 17, 89, 1904.

Hartl (Z. 7, 246, 1894) benutzt eine Wurfkanone von der in Fig. 3180 (K. 4) dargestellten Einrichtung.

Drückt man die Kugel A mit dem Finger in die Hülse, so wird die Spiralfeder f gespannt und kann gespannt erhalten werden, indem man den Einschnitt s des Stäbchens C in die Platte P einspringen läßt. Nun setzt man die Kugel B auf den Draht C, hält die Hülse horizontal und drückt etwas auf B. Alsdann wird A nach links geschleudert und gleichzeitig fällt B frei herab.

Bewegungsenergien summieren sich übrigens nicht wie potentielle Energien, z. B. diejenigen eines Himmelskörpers, welche bedingt sind durch Anwesenheit zweier anderer Himmelskörper und die zu einem System von Niveau- und Kraftlinien führen, welches in seiner Form völlig übereinstimmt mit dem entsprechenden Kurvensystem für ein durch zwei gleichartige Magnetpole hervorgerufenes Feld. Beispielsweise setzen sich zwei gleiche und entgegengesetzte Geschwindigkeiten zusammen zur Geschwindigkeit Null, somit verschwindet auch die Bewegungsenergie.

Von positiver und negativer Energie kann man natürlich nicht sprechen, da der Ausdruck für die kinetische Energie die Geschwindigkeit nur im Quadrat enthält.


Fig. 3179.

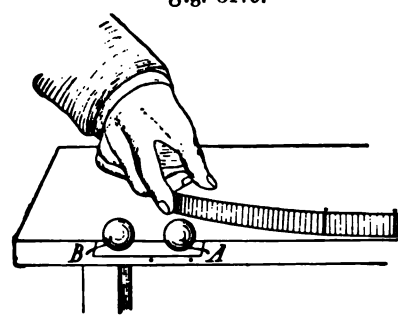
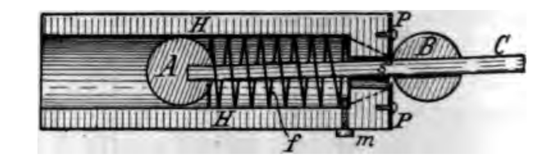


Fig. 3180.



509. Die Wurfbewegung gibt Gelegenheit, die Größe der Endgeschwindigkeit zur Anschauung zu bringen, indem man einen längs einer schiefen Ebene herabrollenden Körper über das Ende der schiefen Ebene hinausfallen läßt, so daß er die bekannte Wurfparabel beschreibt. Aus der Erkenntnis, wie sie durch Zusammensetzung zweier Bewegungen entsteht [1]), erhellt nämlich ohne weiteres, daß die eine dieser Bewegungen die Endgeschwindigkeit gibt, welche der Körper beim Verlassen der schiefen Ebene hatte. Indem man denselben aus verschiedener Höhe herabfallen läßt, kann man zeigen, daß sie der Gleichung $v = g.t$ genügt.

Der Apparat erhält zweckmäßig die in Fig. 3182 dargestellte Form, wobei ein durch die Rinne ab herabrollendes Kügelchen vermöge der erhaltenen Geschwindigkeit die Parabel b 1, 4, o beschreibt. Die Rinne ab derselben ist kreisförmig und wird mit Bimsstein und Öl gut ausgeschliffen. Man muß besonders darauf sehen, daß die auf dem Brettchen be vom Grunde der Rinne aus gezogene horizontale Linie cd wirklich die Tangente der Rinne sei. Man wird aber nie die theoretische Wurfgeschwindigkeit erlangen, und es ist daher am besten, wenn man vor Aufzeichnung der Parabel das Kügelchen durch die Rinne laufen läßt und die Größe der Wurfweite durch Erfahrung sucht; dann erst wird die derselben entsprechende Parabel c 1, 4 aufgezeichnet. Das Grundbrett enthält eine Vertiefung mh, die man mit Sand füllt, damit die Kugel liegen bleibe. Vor dem Versuche muß der

[1]) Einen Wurfdiagraph zur Darstellung der Wurfparabeln nach Fig. 3181 (zu beziehen von M. Kohl, Chemnitz) beschreibt Salcher (Z. 17, 69, 1904).

Fig. 3181.

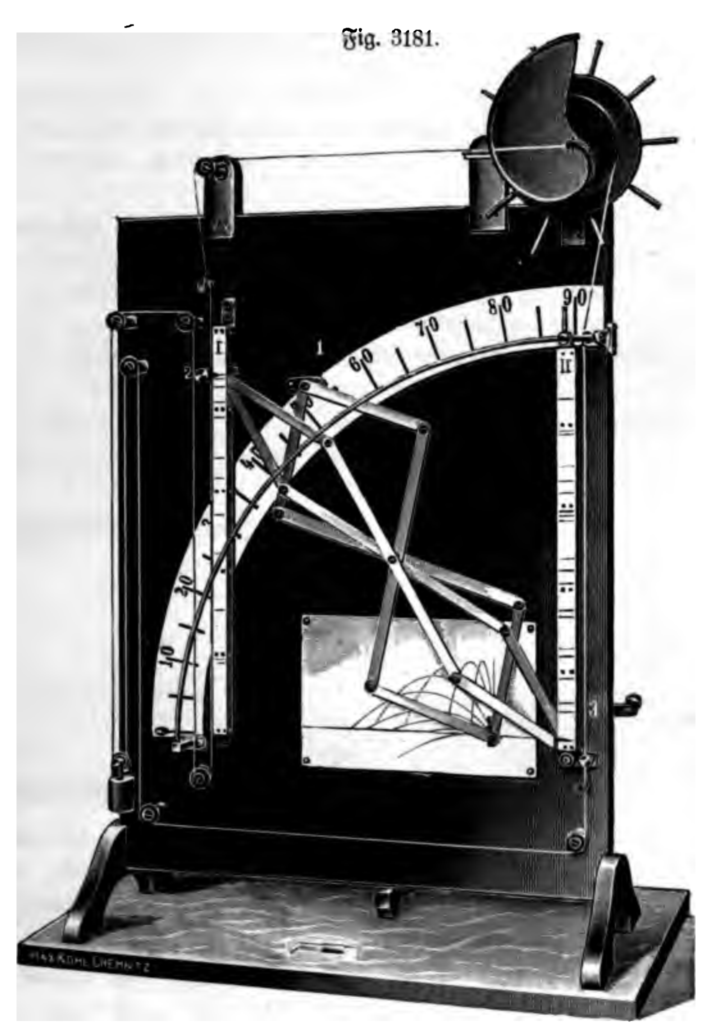
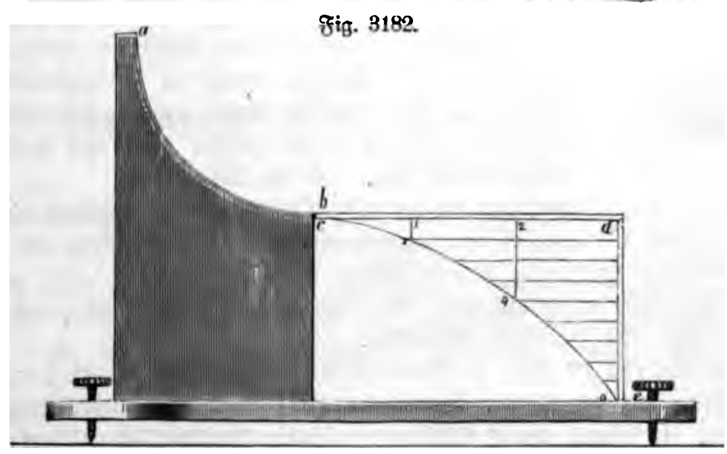


Fig. 3182.



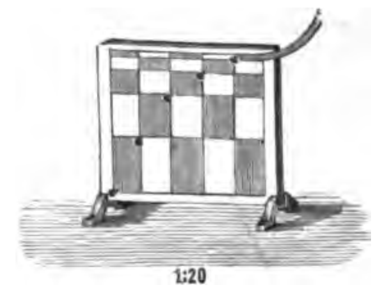


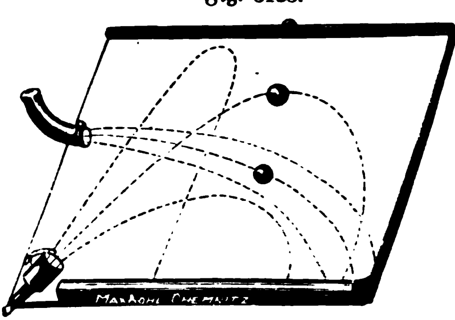
Apparat durch die Stellschrauben vertikal gestellt werden. Das Brettchen *be* wird aus Ahorn gemacht, damit die stark aufgetragenen Linien von weitem gesehen werden können. Nimmt man anderes Holz, so muß dasselbe mit Papier bezogen werden. (Fig. 3183 E, 40.)

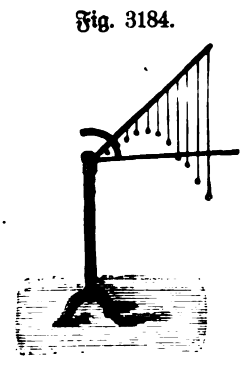
Der Apparat gibt zugleich Gelegenheit, zu zeigen, daß die Endgeschwindigkeit nur von der Fallhöhe, nicht von der Neigung der schiefen Ebene abhängt, selbst wenn diese stetig wechselt, d. h. wenn der Körper längs einer Kurve herabfällt.

Zur Erläuterung der Konstruktion der Wurfparabel hat Hagenbach (1868) einen sehr brauchbaren Apparat ersonnen, bestehend aus einer Stange, an welcher in gleichen Abständen Schnüre von den Längen 1, 4, 9 . . . befestigt sind, welche durch kleine Bleikugeln an den Enden lotrecht gespannt erhalten werden. Gibt man der Stange verschiedene Neigungen, so liegen die beschwerten Enden der Schnüre


Fig. 3183. Fig. 3185.






Fig. 3184.

auf einer Parabel, welche die Wurfbahn darstellt für eine Elevation = der Neigung der Stange und eine Wurfgeschwindigkeit = den Abständen zwischen den Schnüren, wobei die Länge der ersten Schnur die Größe $\frac{g}{2}$ repräsentiert. (Fig. 3184 Lb, 20.)

Ducrue (Z. 7, 250, 1894) läßt eine aus einer Fallrinne kommende Kugel auf eine Schultafel treffen, welche unter etwa 10° Neigung gegen die Horizontalebene aufgestellt ist. Die benetzte Kugel zeichnet selbsttätig einen Parabelast auf der Tafel, welcher dann mit Kreide nachgezogen wird (Fig. 3185 K, 33).

K. T. Fischer (1902) läßt die geworfenen elfenbeinernen Kugeln an einer mit berußtem weißem Glanzpapier überzogenen vertikalen Tafel streifen, die Parabel ist dann weiß auf schwarzem Grunde fixiert.

Man kann hier namentlich auch den Unterschied zwischen Flach- und Steilwurf (Kanonen und Haubitzen) besprechen.

Grimsehl (Z. 16, 143, 1903) macht darauf aufmerksam, daß die Fallhöhe in Verbindung mit der Wurfweite auch zu Zeit- und Geschwindigkeitsmessungen dienen kann. Er benutzt eine in Spielwarengeschäften käufliche Feder-(Eureka-)Pistole (S. 1219) auf Stativ zum festen Einspannen in bestimmter Richtung [1].

Zum Spannen der Feder ist ein Gewicht von 1500 g bei 5 cm Verschiebung erforderlich, die Spannungsenergie beträgt also $\frac{1}{2}$.1,500.0,05 kgm. Die Ge-

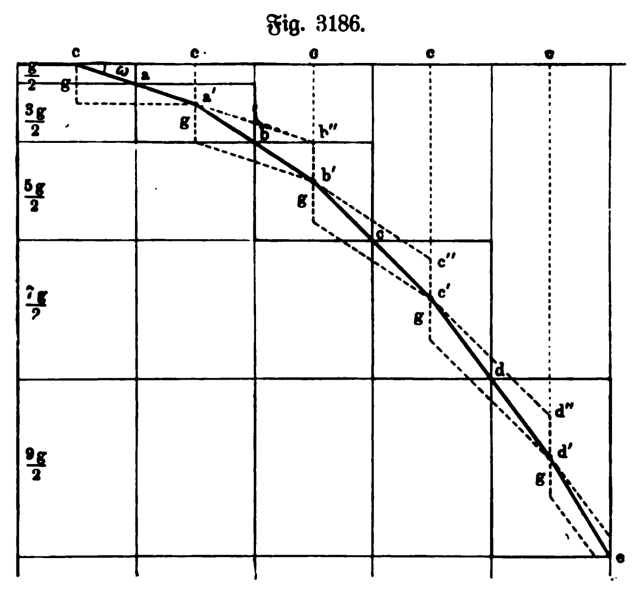
[1]) Zu beziehen von E. Günther, Institutsmechaniker in Hamburg.

schwindigkeit ergibt sich bei horizontalem Wurf aus der Wurfweite des Geschosses, welche dadurch bestimmt wird, daß man das Geschoß mit weißer Farbe bestreicht und den Abstand des beim Auftreffen erzeugten weißen Fleckes bestimmt aus der aus der Fallhöhe berechneten Wurfzeit. Die hiernach berechnete kinetische Energie des Geschosses stimmt überein mit der Spannungsenergie der Feder.

Ferner benutzt Grimsehl ein kleines Geschütz aus Messingrohr von 5 mm innerem Durchmesser und 6 cm Länge, welches auf ein Stück Messingblech als Fuß aufgelötet und in der Mitte mit einem Zündloch versehen ist. Als Pulver dient Jagdpulver in einer Säule von 3 bis 8 mm Länge. Sind die auf beiden Seiten eingeschobenen Geschosse gleich schwer, so sind auch ihre Wurfweiten gleich, ist das eine schwerer, so ist seine Geschwindigkeit kleiner, in jedem Falle bleibt aber das Geschütz wegen der Gleichheit der Kräfte unverändert an seinem Platze.

Was die Konstruktion der Wurfparabel anbelangt, so kann man zwei verschiedene Betrachtungsweisen anwenden.

Fig. 3186.



Einem Körper möge, wie Fig. 3186 andeutet, die Geschwindigkeit c in horizontaler Richtung mitgeteilt werden, so daß er sich vermöge dieser Geschwindigkeit am Ende der 1, 2, 3, 4, 5... ten Sekunde in den Entfernungen c, $2c$, $3c$, $4c$, $5c$... vom Ausgangspunkte befindet. Die Schwere bewegt ihn in der gleichen Zeit um $\frac{g}{2}$, $\frac{4g}{2}$, $\frac{9g}{2}$, $\frac{16g}{2}$, $\frac{25g}{2}$... Meter abwärts, so daß also die tatsächlichen Orte des Körpers zu den gedachten Zeiten sein müssen die Punkte a, b, c, d, e... Die diese Punkte verbindende Kurve (Parabel) ist die Wurfbahn.

Bei der anderen Betrachtungsweise denkt man sich die Schwerkraft nicht kontinuierlich, sondern stoßweise wirkend, so daß sie jeweils in der Mitte einer Sekunde dem Körper die Geschwindigkeit g mitteilt. Der Weg, welchen der geworfene Körper in irgend einem Zeitteilchen zurücklegt, ist aus zwei Teilen zusammengesetzt, nämlich aus dem Wege, welchen er in dem fraglichen Zeitteilchen in tangentialer Richtung vermöge seiner erlangten Geschwindigkeit zurückgelegt haben würde, und dem Wege, welcher der Wirkung der Schwerkraft in diesem Zeitteilchen entspricht. Er gelangt also successive nach den Punkten a', b', c' ..., welche dieselbe Kurve ergeben, wie die nach der vorigen Methode gewonnenen Punkte a, b, c ...

510. Zentrifugalkraft. Da nach dem Trägheitsprinzip ein bewegter Körper sich in gerader Linie fortzubewegen sucht, so ist eine Kraft notwendig, um ihn zu

nötigen, sich im Kreise zu bewegen, z. B. die Spannung einer im Zentrum des Kreises befestigten Schnur. Diese Spannung äußert sich nach dem Gesetze von Gleichheit und Wirkung und Gegenwirkung einesteils in der Weise, daß sie den Körper gegen das Zentrum hinzieht (Zentripetalkraft), anderenteils so, daß sie einen Zug auf den Drehpunkt ausübt (Zentrifugalkraft oder Fliehkraft).

Ein bekanntes Beispiel ist die **Schleuder**; ein überraschender Versuch das Herumschwingen eines mit Wasser gefüllten Bechers nach Fig. 3187, ohne daß das Wasser ausläuft.

Anstatt durch eine gespannte Schnur kann man den Körper (z. B. einen kleinen Wagen) auch durch ein **Schienengeleise** nötigen, sich im Kreise zu bewegen. Damit keine Entgleisung stattfindet, d. h. die resultierende Kraft die Schiene senkrecht zur Unterstützungsfläche drückt, muß die äußere Schiene gegen die innere erhöht sein. Die schiefe Stellung eines **Zirkusreiters** oder eines im Bogen fahrenden **Radlers** oder **Schlittschuhläufers** bietet ein einfaches Mittel, diese Verhältnisse klar zu machen.

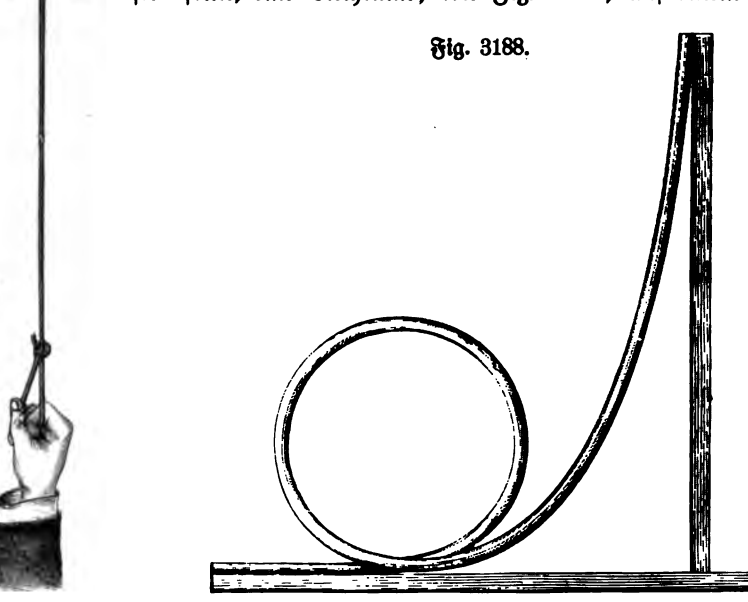

Fig. 3187.

Fig. 3188.

Ein Modell der Zentrifugaleisenbahn kann man um billiges Geld im Spielwarenladen erhalten, oder, wenn dieses nicht der Fall sein sollte, eine Blechrinne, wie Fig. 3188, auf einem hölzernen Gestell anbringen, wo der Halbmesser des Ringes etwa ein Zehntel von der ganzen Fallhöhe betragen muß. Eine wohl abgerundete Bleikugel durchläuft dann die ganze Bahn, wenn sie in der gehörigen Höhe in die Rinne gelegt wird. (In neuester Zeit werden vielfache Variationen bei Zirkusvorstellungen vorgeführt.)

Ebenso kann man eine Spiralbahn herstellen aus parallelen, durch angelötete Querdrähte verbundenen, entsprechend gebogenen starken Messingdrähten, auf welchen eine Kugel herabrollt, event. auch aus einer U-Eisenschiene.

Für den Fall der Kreisbewegung kann man folgende Betrachtung anstellen.

Bezeichnet c die Tangentialgeschwindigkeit, ω den Winkel, um welchen sich ihre Richtung in jeder Sekunde ändert, in Bogenmaß und g die durch die Zentripetalkraft erzeugte Beschleunigung, so ist:

$$g = c . \omega \qquad\qquad p = m . g,$$

also

$$p = m . c . \omega,$$

oder wenn T die Umlaufszeit, da der Körper in T Sekunden die ganze Kreisperipherie $2 \pi r$ zurücklegt, also

$$c = \frac{2 \pi r}{T}$$

und da ferner die Summe aller ω in T Sekunden 2π beträgt, folglich in einer Sekunde

$$\omega = \frac{2 \pi}{T}$$

sein muß:

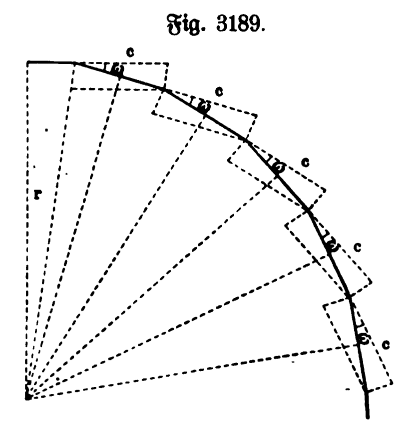
$$p = m \cdot \frac{2 \pi r}{T} \cdot \frac{2 \pi}{T} = m \cdot \frac{4 \pi^2 . r}{T^2}$$

oder

$$p = m . r . \omega^2,$$

d. h. die Zentripetalkraft muß, damit die Bahn eine kreisförmige vom Radius r werde, gleich sein dem Produkte der Masse des Körpers mit dem Abstande desselben vom Drehungszentrum und dem Quadrate der Winkelgeschwindigkeit.

Fig. 3189.



Zur Erläuterung dieses Gesetzes der Zentralbewegung dient die Schwungmaschine. Sie besteht im wesentlichen aus einem größeren Rade A, Fig. 3190 ($^1/_{15}$), mit Schnurlauf, um ein kleineres B, auf dessen Achse verschiedene Aufsätze geschraubt werden können, in schnelle drehende Bewegung zu versetzen. Das letztere Rad hat den einen Stützpunkt im Grundbrette, den anderen in dem Bügel CC. Die Achse von B muß mit ihrer Schraube über dieses Brettchen hinausreichen. Bei ihrem Bau ist zu berücksichtigen, daß die beiden Scheiben ein einfaches Verhältnis zueinander haben, um aus den in einer bestimmten Zahl von Sekunden von Hand bewirkten Umdrehungen der größeren Scheibe jene der kleineren leicht ableiten zu können. Für eine gleichförmige Bewegung ist ferner erforderlich, daß die größere Scheibe ein ziemliches Gewicht habe. Ist dasselbe daher an einer schon vorhandenen Maschine von Holz, so geschieht dieses am einfachsten, wenn man auf dessen Kranz unterhalb einen gußeisernen Ring anschraubt. Beim Neubau einer Schwungmaschine wird man zweckmäßiger ein gußeißernes Rad verwenden. Um die Treibschnur beliebig spannen zu können, kann man die Achse des Rades, wie in Fig. 3191, im Grundbrette beweglich anbringen und sie durch die Schraube a, nachdem die Schnur gespannt ist, befestigen. Die Achse muß dann breit auf dem Querholze mm

Fig. 3190.



aufsitzen, geht viereckig durch dieses und das untere Querholz *nn* durch und endigt in eine Schraube; eine Mutter *aa* mit Lappen dient zum Anpressen beider Hölzer gegen das Grundbrett *cc*, wodurch die Achse festgestellt wird.

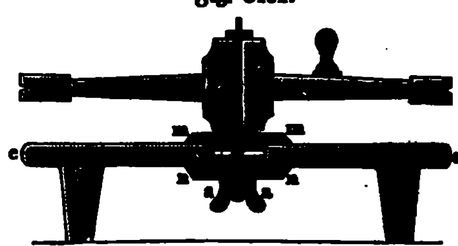


Fig. 3191.

Anstatt dieser Befestigungsweise des Schwungrades kann auch, wie in der Fig. 3192, in dem Grundbrette der Schieber, in welchem die Achse fest-

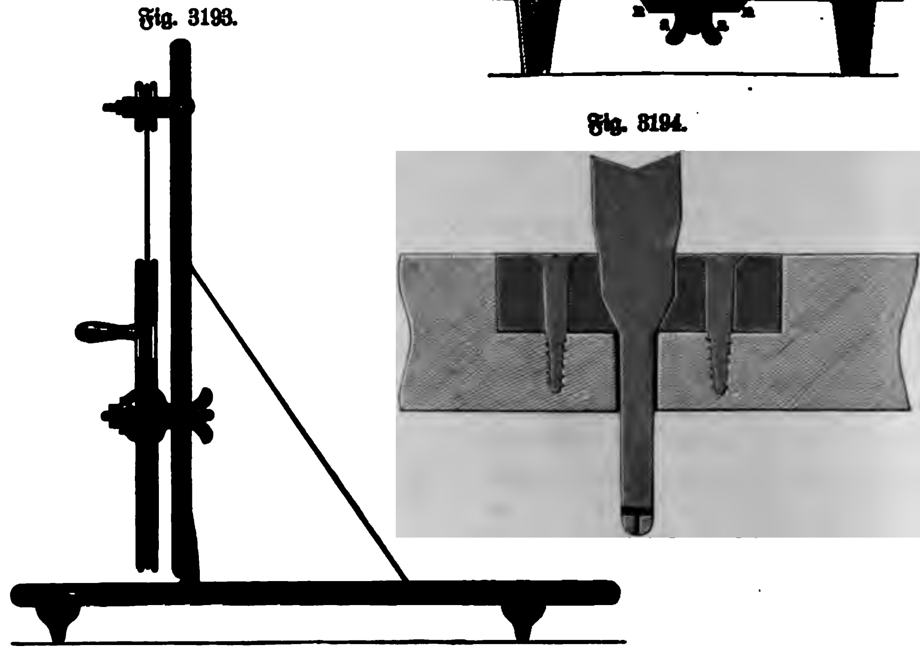

Fig. 3193.

Fig. 3194.

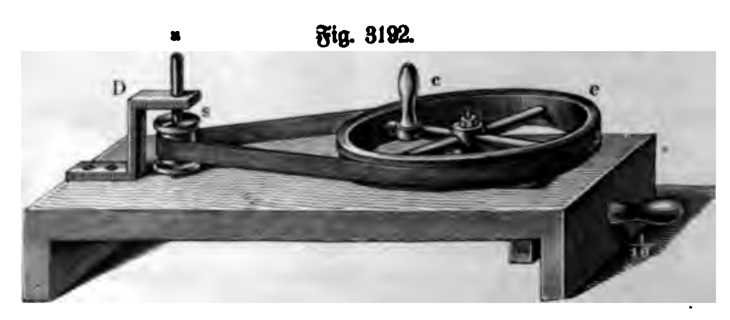


Fig. 3192.

gemacht ist, durch eine Schraube verschoben werden, um dadurch den Riemen zu spannen. In dieser Figur ist auch das Schwungrad von Eisen und der untere Tragpunkt der Rollenachse durch eine Schraube angegeben, während der Bügel *D* das obere Lager trägt; letzterer ist jedoch in manchen Fällen weniger geeignet als der Bügel *CC*, Fig. 3190.

Für viele Zwecke ist es bequem, wenn man eine horizontale Umdrehungsachse besitzt. Die Schwungmaschine ist nach Fig. 3193 leicht auch dazu einzurichten.

Für einzelne Versuche ist es auch bequem, eine vertikale Achse in Umdrehung zu setzen, an welcher man z. B. ein Pendel oder eine Scheibe aufhängen kann. Man

läßt zu dem Zwecke die Achse unten konisch in ihrem Lager aufsitzen, durchbohrt dasselbe, so daß eine Verlängerung der Achse unten hervorragen kann, wie in

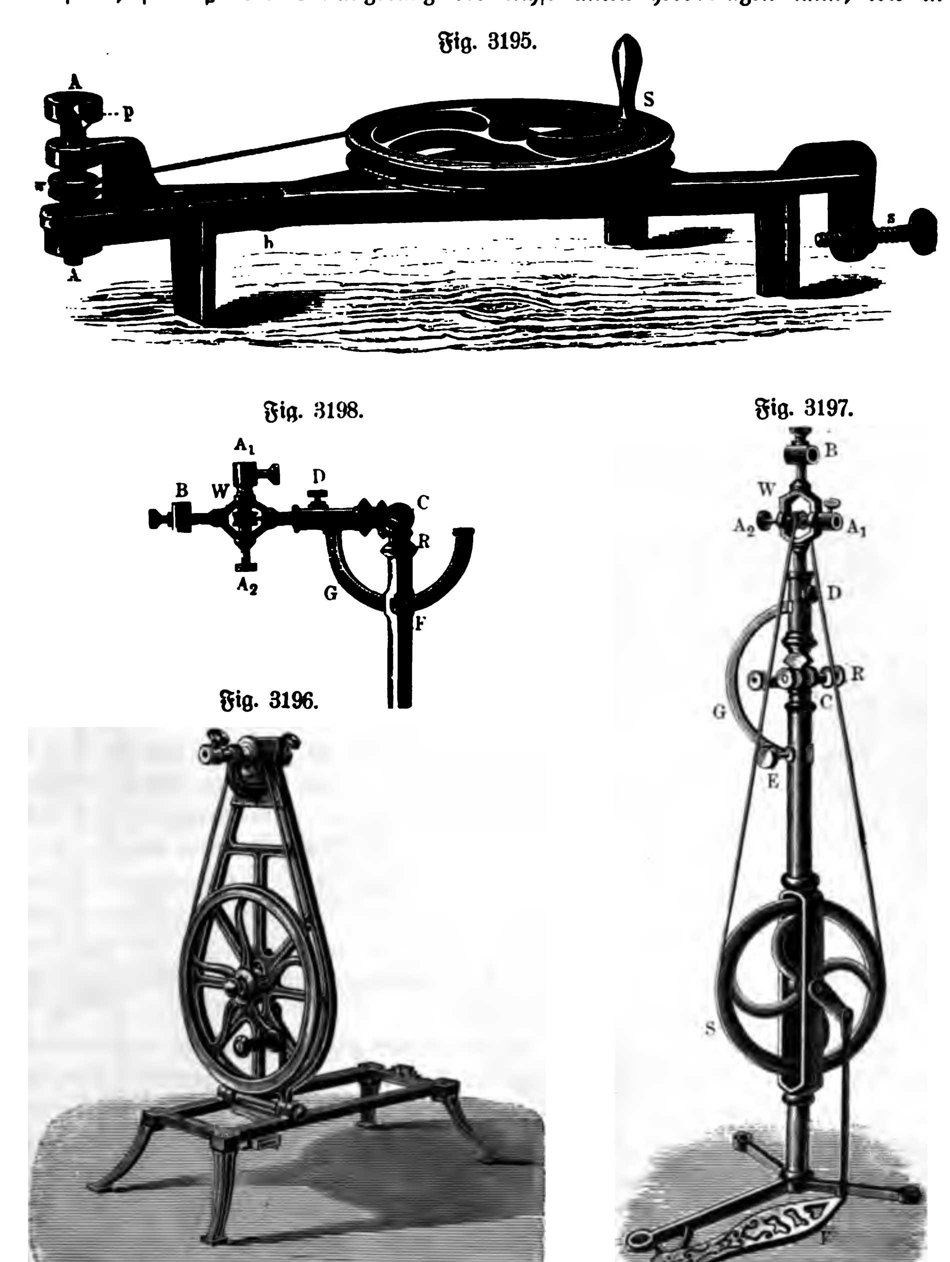


Fig. 3195.

Fig. 3198.

Fig. 3197.

Fig. 3196.

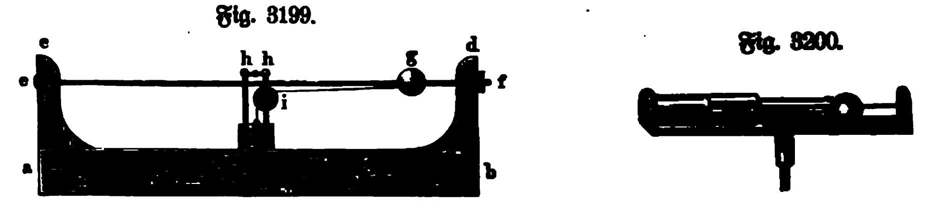
Fig. 3194. Dieses Ende erhält eine feine Bohrung von unten und durch diese ein etwas weiteres Querloch. Der Faden, welcher aufgehängt werden soll, wird durch die feine Öffnung ein- und durch das Querloch herausgeführt und hier auf irgend eine Weise befestigt. Daß man hierfür die Bodenplatte über den Tisch hervorragen lassen muß und ihre Füße danach gerichtet werden müssen, ist selbstverständlich.

Für manche Zwecke wird es bequem sein, wenn auf das Ende der Achse ein Gewinde angeschnitten ist.

Verschiedene neuere Formen der Schwungmaschine zeigen die Fig. 3195 (K, 72); 3196 (E, 120); 3197 und 3198 (E, 100).

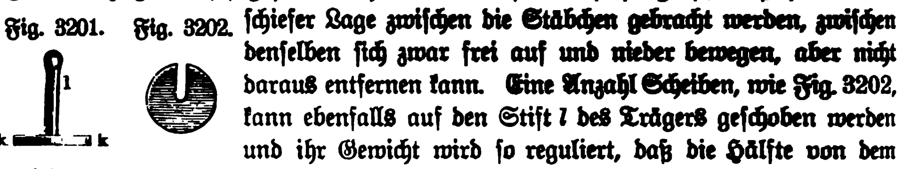
511. Versuche mit der Schwungmaschine. Auf die Achse der Rolle schraubt man den Ansatz, den Fig. 3199 oder Fig. 3200 (K, 11) zeigt. Er besteht aus einem starken Holze *ab*, das außerhalb und von unten noch mit Blei ausgegossen wird. Durch die Lappen *ac*, *bd* geht ein abgeschmirgelter Stahlstab *ef*, der einerseits bei *e* einen Kopf, anderseits bei *f* eine Schraube hat und hier durch eine Mutter befestigt wird; er ist 3 bis 4 mm dick. Auf diesem Drahte kann die zentral durchbohrte hölzerne oder elfenbeinerne Kugel *g* leicht gleiten. Genau im Quadrat um den Umdrehungsmittelpunkt stehen vier Messingstäbchen *h*, *h*, welche über und unter

Fig. 3199. Fig. 3200.



dem Drahte *ef* durch mit Schrauben versehene Querstücke verbunden sind. Zwei derselben tragen die leicht bewegliche Rolle *i*, deren Schnurlauf auf der Seite gegen die Mitte dem Mittelpunkt selbst entspricht. Von einem Häkchen der Kugel *g* läuft eine seidene Schnur über *i* und ist anderseits an einem Träger von Messing, den Fig. 3201 zeigt, befestigt; die Scheibe *kk* desselben ist so groß, daß sie nur in schiefer Lage zwischen die Stäbchen gebracht werden, zwischen denselben sich zwar frei auf und nieder bewegen, aber nicht daraus entfernen kann. Eine Anzahl Scheiben, wie Fig. 3202, kann ebenfalls auf den Stift *l* des Trägers geschoben werden und ihr Gewicht wird so reguliert, daß die Hälfte von dem Gewichte des Trägers als Einheit dient. Die seidene Schnur hat drei Schleifen, so daß mittels derselben die Kugel *g* in Entfernungen vom Mittelpunkte, die sich verhalten wie 1:2:3, angehängt werden kann.

Fig. 3201. Fig. 3202.



Man kann nun entweder nur im allgemeinen zeigen, und dieses wird meistens genügen, daß bei gleicher Entfernung der Kugel eine um so schnellere Drehung nötig wird, bis die Kugel das Gewicht hebt, je größer dieses ist, und daß, wenn man die Kugel *g* von der Entfernung 1 auf 3 bringt, dafür aber dreimal langsamer dreht, so daß die Kugel auf ihrer Bahn gleiche Geschwindigkeit hat wie bei der Entfernung Null, das Gewicht noch nicht gehoben wird; sondern erst bei einer schnelleren Drehung. Man kann aber auch nach einem Sekundenpendel die Zahl der Umdrehungen des großen Rades, und aus dessen Verhältnis zur Rolle die Zahl der Umdrehungen der Kugel pro Sekunde, folglich die den Halbmessern 1, 2 oder 3 entsprechenden Umlaufszeiten bestimmen und dann durch Nachrechnung zeigen, daß immer in zwei aufeinander folgenden Versuchen die aus den Halbmessern und den Umlaufszeiten berechneten Zentrifugalkräfte den gehobenen Gewichten proportional sind. Man muß hierbei die Geschwindigkeit nur sehr langsam steigern und sehr gleichförmig erhalten, was eben eine größere Schwere des Schwungrades erfordert.

Nach einiger Übung bringt man es schon dahin, das Gewicht in geringer Höhe so lange schwebend zu erhalten, um jetzt die Umdrehungszeit mit dem Pendel zu bestimmen. Man kann den Augenblick, wo das Gewicht gehoben wird, dadurch sehr leicht beobachten, daß man auf *ab* genau in der Mitte eine Papierscheibe leimt, die mit den messingenen Gewichten gleich groß ist und also erst sichtbar wird, wenn diese sich heben [1]).

Fig. 3204 zeigt eine mit Federwage *A* versehene Vorrichtung nach Hartl (Z. 10, 124, 1897 [2]).

Zur Bestimmung der Umdrehungszahl dienen Tourenzähler (Fig. 3205 E, 12 und 3206 [3]) in Verbindung mit einem Chronoskop (Fig. 3207 Lb, 25) oder besser der S. 650 erwähnten Sekundenuhr oder einem Sekundenschläger (S. 147). Besonders bequem sind Umdrehungszähler, bei welchen nach je 100 Umdrehungen ein Glockenschlag ertönt. Ich verwende einen solchen in größeren Dimensionen ausgeführten Tourenzähler, welcher durch eine biegsame Welle mit der Achse der Zentrifugalmaschine verbunden wird. Die Umdrehung erfolgt mittels der Transmissionsanlage, wodurch weit gleichmäßigere Geschwindigkeit erzielt wird als bei Handbetrieb.

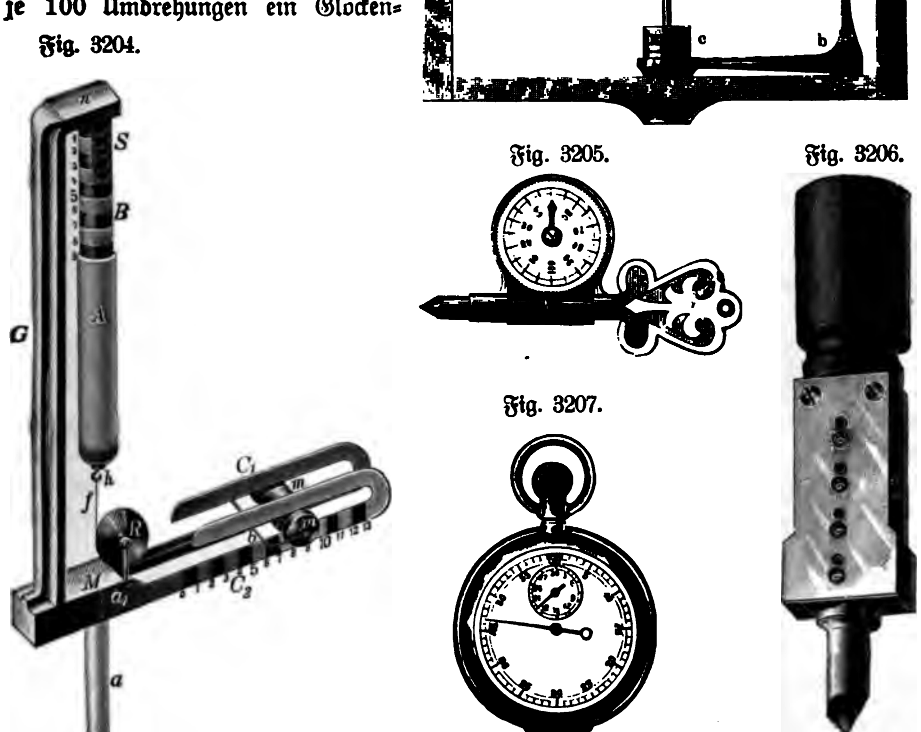


Fig. 3203. Fig. 3204. Fig. 3205. Fig. 3206. Fig. 3207.

[1]) Will man sich mit einer einfacheren Vorrichtung und nur immer demselben Halbmesser begnügen, so kann man die in Fig. 3203 abgebildete nehmen, deren Winkelhebel *cbd* bei *b* eine leicht bewegliche Achse hat und bei *c* verschiedene Gewichte aufnimmt. — [2]) Will man keine messenden Versuche machen, so ist es am einfachsten, die Kugel *g* in Fig. 3199 an einer um den Draht *ef* gelegten und von *e* bis über die Mitte reichenden Spiralfeder zu befestigen, welche durch ihre Spannung der Zentrifugalkraft das Gleichgewicht hält. — [3]) Zu beziehen von Delisle u. Ziegele in Stuttgart zu 10 Mk.

Fig. 3208 (L, 30) zeigt einen fest mit dem die Achse treibenden Elektromotor verbundenen Tourenzähler, welcher nach Belieben ein- und ausgeschaltet werden kann.

Man kann auch Tachometer (Fig. 3209 E, 75 und 3210 [1]) verwenden, deren Einrichtung im einfachsten Falle eben gerade auf dem Gesetze der Zentrifugalkraft

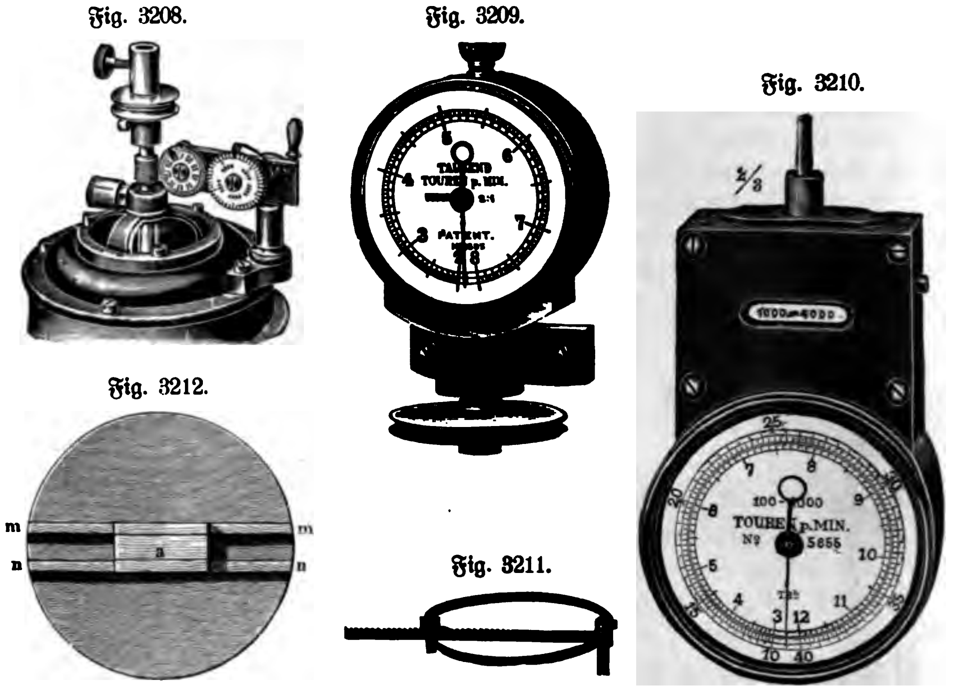


Fig. 3208. Fig. 3209. Fig. 3210. Fig. 3212. Fig. 3211.

beruht. Man könnte z. B. die Federwage Fig. 3204 so eichen, daß sie statt der Zentrifugalkraft die Winkelgeschwindigkeit angibt. Ähnlich ist die Vorrichtung Fig. 3211 (E, 12), welche indes nicht zur Messung, sondern nur zur Schätzung dienen kann.

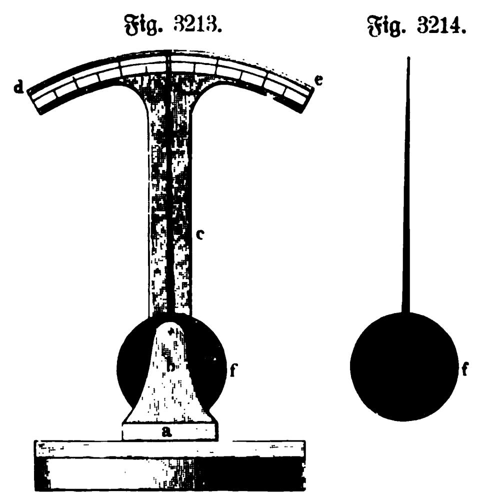


Fig. 3213. Fig. 3214.

Sie besteht aus einer glatten Stange, längs welcher ein durchbohrtes, durch eine Spiralfeder gehaltenes Gewicht gleiten kann. Mittels eines Sperrzahnes greift dasselbe in eine vertiefte, nach außen gerichtete Verzahnung der Stange ein, so daß es sich wohl vom Mittelpunkt entgegen der Wirkung der Feder entfernen, nicht aber in seine frühere Lage zurückkehren kann.

Eine andere Form des Versuches zeigen die Fig. 3212, 3213 und 3214. Das Brettchen in Fig. 3212 wird auf die Achse geschraubt, es trägt zwei Leisten *mm*, *nn*, zwischen welchen der Schieber *a* verstellt werden kann; er trägt mittels der Ständer *b* und *c*, Fig. 3213, an einer

[1]) Zu beziehen von Dr. Th. Horn, Großzschocher-Leipzig.

dünnen stählernen Achse die Bleischeibe *f*, deren Zeiger vor dem Kreisbogen *de* spielt. Wird nun der Schieber *a* aus dem Mittelpunkt gebracht und die Schwungmaschine gedreht, so weicht der Zeiger um so mehr ab, je exzentrischer *a* gestellt und je schneller gedreht wird.

2) Der Zentrifugalregulator kann ebenfalls zu gleichem Zwecke dienen. Bei einer mit Hand betriebenen Maschine ist es allerdings schwierig, den mit der Umdrehungszahl wachsenden Abstand der Kugeln eines Regulators richtig vorzuführen — sie fliegen meist bis an die äußerste Grenze und fallen auch plötzlich wieder zusammen —, bei einer durch Elektromotor oder Transmission betriebenen läßt sich aber der Regulator beliebig lange in der Mittellage halten[1]) (Fig. 3215).

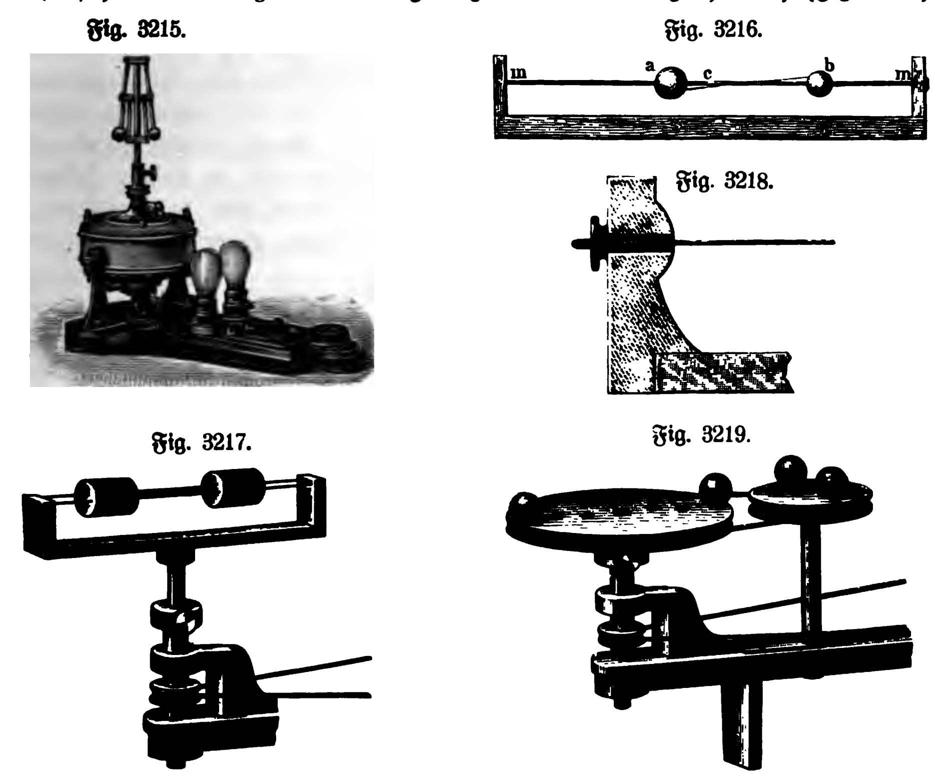


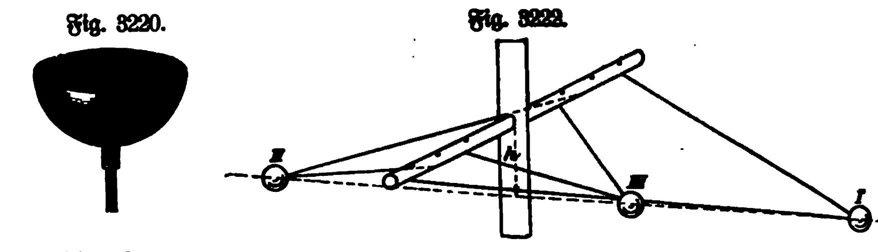
Fig. 3215. Fig. 3216. Fig. 3218. Fig. 3217. Fig. 3219.

3) Daß bei gleicher Umdrehungszeit die Zentrifugalkraft dem Halbmesser umgekehrt und der Masse gerade proportioniert sei, kann man durch den Ansatz Fig. 3216 und 3217 (Lb, 5,50) zeigen. Die Gewichte der beiden (gewöhnlich) elfenbeinernen Kugeln *ab* verhalten sich wie 2 : 1, und beide können sich leicht auf dem höchstens 1 bis 1,5 mm starken und gut abgezogenen Drahte *mm* verschieben. Die Beschaffenheit der beiden Endstücke zeigt Fig. 3218 in größerem Maßstabe. Die Kugeln sind durch ein seidenes Schnürchen verbunden und werden vor dem Versuche so gestellt, daß ihre Entfernungen vom Mittelpunkte sich umgekehrt wie ihre Massen verhalten. Ist man hier genau gewesen, so halten sich die Kugeln bei jeder Geschwindigkeit das Gleichgewicht.

[1]) Versieht man den Regulator mit einer Skala, so kann man ihn auch als Tachometer gebrauchen, selbst in horizontaler Lage, wenn man ihn auf eine Federwage wirken läßt.

4) Den Einfluß der Geschwindigkeit zeigt in einfacher Weise die Kombination zweier mit verschiedener Geschwindigkeit umlaufender Achsen Fig. 3219 (Lb, 16,50), wobei der Einfluß der Geschwindigkeit durch verschiedene Entfernungen der in kleinen Vertiefungen ruhenden Kugeln von der Drehachse kompensiert wird.

Fig. 3220. Fig. 3222.



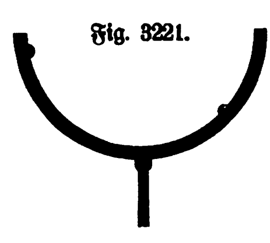
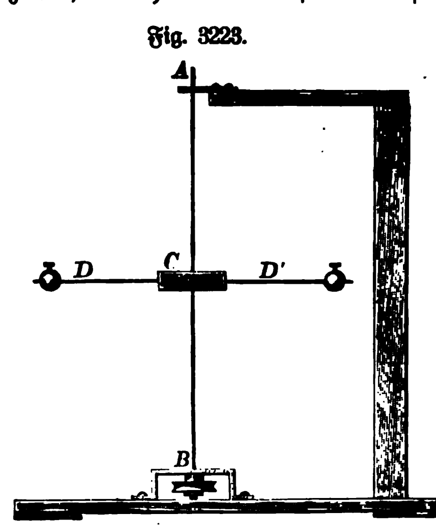


Fig. 3221.

5) Kugelschwebe nach August. Eine halbkugelförmige Glasschale wird auf die Achse aufgesteckt, einige gleich große aber verschieden schwere Kugeln eingebracht. Beim Drehen steigen dieselben bis zu gleicher Höhe [1]). Einfacher kann statt der Schale eine halbkreisförmige vertikal stehende Rinne benutzt werden. (Fig. 3220 E, 10,50; 3221 E, 10.)

K. Fuchs (Z. 16, 343, 1903) empfiehlt die in Fig. 3222 dargestellte Form, wobei drei Pendel von verschiedener Länge an einer horizontalen Querstange hängen. Wenn man die Achse immer schneller dreht, so hebt sich erst das längste, dann das zweite, endlich das dritte Pendel u. s. w., so daß die gehobenen Kugeln immer in derselben Ebene kreisen. Für die Tiefe h der kreisenden Kugel unter dem Aufhängepunkt gilt die Formel $h = g/w^2$, wo w die Winkelgeschwindigkeit ist. h ist also nicht nur von der Masse, sondern auch von der Länge des Pendels unabhängig (Wattsches Pendel [2]).

Fig. 3223.



512. Freie und unfreie Achsen. Die Notwendigkeit der Ausbalancierung von Maschinenachsen demonstriert Oosting (Z. 11, 282, 1898), indem er, wie Fig. 3223 zeigt, an einer Stricknadel AB eine zweite Stricknadel DD' mit zwei verstellbaren Kugeln befestigt und erstere in Drehung versetzt. Ist der Abstand der Kugeln ungleich, so ist sie unfreie Achse, übt einen Druck auf die Lager und wird durchgebogen. Frei ist eine Achse dann, wenn sie durch den Schwerpunkt geht.

513. Gleichgewicht der Zentrifugalkräfte. Abgesehen davon, daß die Zentrifugalkraft nur einen Angriffspunkt besitzt, nicht zwei, wie eine wirkliche Kraft, kann

---

[1]) Siehe Weinhold, Phys. Demonstrationen, 3. Aufl., 1899, S. 93. — [2]) Über verschiedene andere Aufsätze zur Schwungmaschine siehe Hartl, Z. 14, 327, 1901 und Z. 10, 121, 1897.

man sie nach d'Alemberts Prinzip wie eine solche behandeln, d. h. man kann an ihre Stelle eine wirkliche Kraft gesetzt und den Körper statt in Bewegung im Gleichgewichte befindlich denken. In diesem Sinne kann man von dem Gleichgewichte der auf die einzelnen Massenteilchen eines Körpers wirkenden Zentrifugalkräfte sprechen. Zu diesem Gleichgewicht ist es nicht ausreichend, daß die Achse durch den Schwerpunkt geht. Die nähere Untersuchung ergibt die Existenz von drei zueinander senkrechten Hauptdrehungsachsen, von welchen die eine dem größten, die andere dem kleinsten Trägheitsmoment entspricht. Die erstere ist die stabile freie Drehachse.

514. Schwungrad. Um das Zerspringen eines Schwungrades infolge der Schwankungen der Achse, wenn ein Lager nicht fest ist, zu erläutern, kann man ein Schwungrad mit biegsamen Drahtspeichen und einem Kranz aus einer starken Messingspiralfeder verwenden. Setzt man es schief auf die Achse, so verbiegen sich die Speichen derart, daß der Kranz in eine zur Achse senkrechte Ebene kommt. Hier wäre auch hinzuweisen auf die Verwendung des Schwungrades als Energieakkumulator, Schwungradregulator, Schwungkugelbremse.

515. Stabile und labile Achsen. Modelle zur Demonstration stabiler und labiler Drehachsen hat Hartl (Z. 10, 122, 1897) angegeben. Zum Betrieb dient die Schwungmaschine. Bei dem Modell Fig. 3224 kann man zunächst, während die Schraube *c* lose ist, so daß sich der Wagebalken *d* um *c* drehen kann, die Verteilung der Massen so regulieren, daß *c* Schwerpunkt wird. Zieht man nun *c* fest, löst die Schraube *f*, so daß sich der Arm *a* um *f* drehen kann, und setzt die Schwungmaschine in Tätigkeit, so tritt keine Änderung ein; die Drehachse ist eine freie, weil sie durch den Schwerpunkt geht. Änderung der Massenverteilung macht sie aber sofort zur unfreien, der Arm *a* nimmt einen der Zentrifugalkraft entsprechenden Ausschlag an.

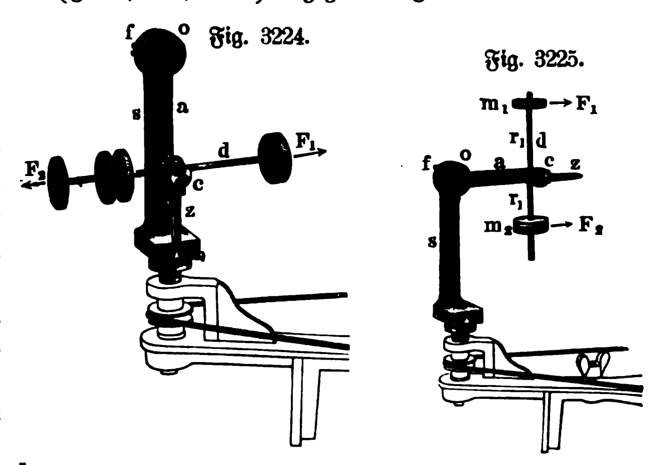
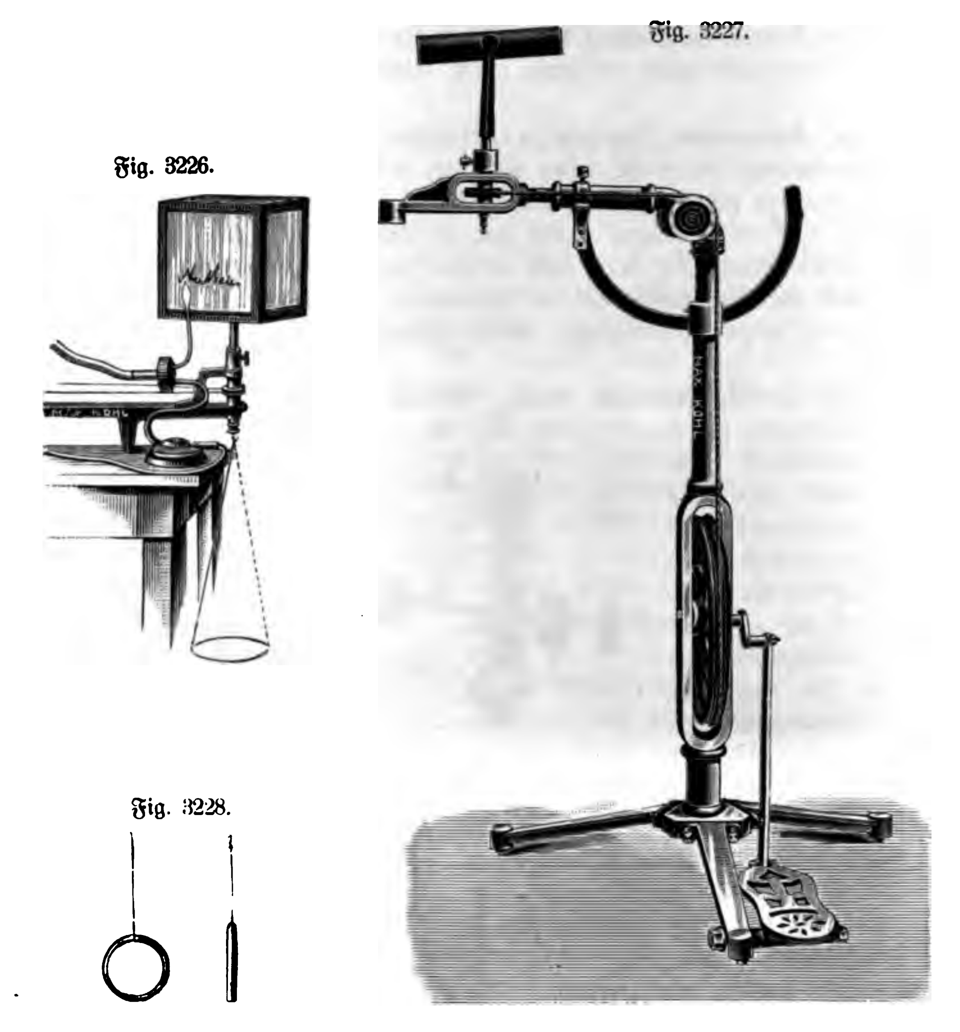


Fig. 3224. Fig. 3225.

Zieht man bei horizontaler Stellung von *a* (Fig. 3225) die Schraube *f* fest an und stellt den Wagebalken *d* vertikal, so behält er bei der Drehung diese Stellung, wenn die beiden Massen m_1 und m_2, also die Fliehkräfte F_1 und F_2, gleich sind. Ist dies nicht der Fall, so überwiegt die Fliehkraft der schwereren Masse und *d* stellt sich alsbald horizontal. Auch bei gleichen, von *c* gleich weit abstehenden Massen m_1 und m_2 legt sich *d* sofort um, wenn er anfänglich nicht vertikal stand, weil dann die von der Drehachse weiter entfernte Masse größere Fliehkraft annimmt.

Bei Drehung eines Cylinders um seine eigene Achse ist diese nur dann stabil, wenn die Höhe kleiner ist als 0,866 . Radius. Ist sie größer, so ist die senkrecht

dazu durch den Mittelpunkt gehende Achse stabile Drehachse, somit stellt sich in diesem Falle der an einer Schnur an der Schwungmaschine vertikal abwärts hängende Cylinder bei der Drehung horizontal ein, nicht dagegen, wenn die Höhe kleiner als 0,866 . Radius (Fig. 3226 K, 1,75). Ähnliche Experimente lassen sich mit anderen Körpern, wie Kugel, Kegel, Ring, Kette u. s. w. ausführen

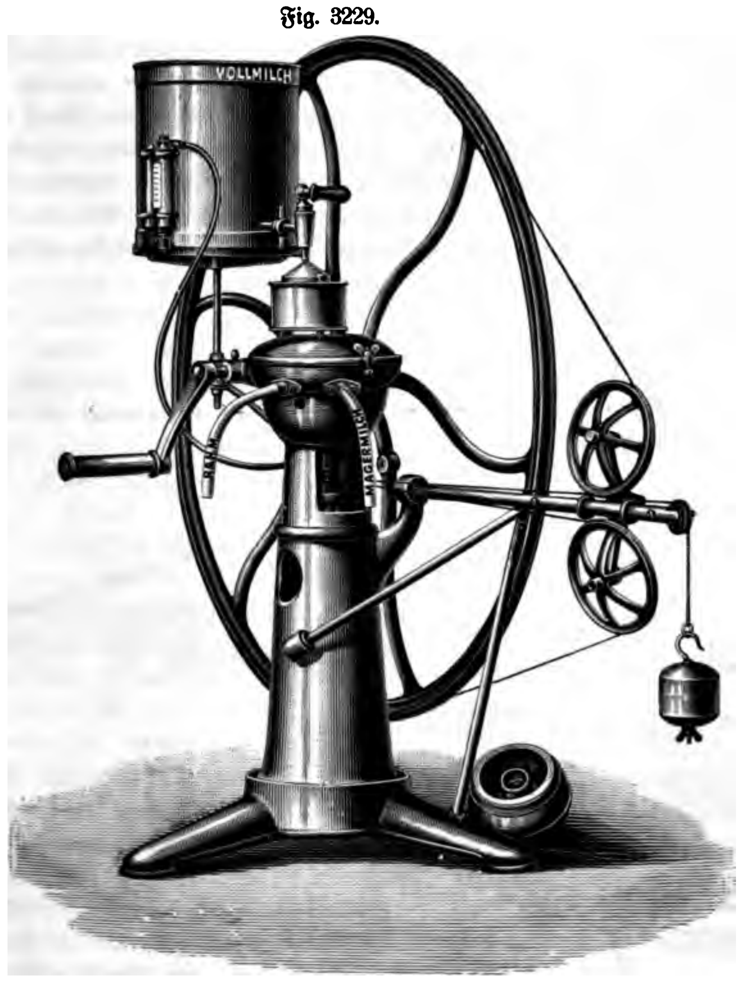

Fig. 3226. Fig. 3227. Fig. 3228.

(Fig. 3227 K, 105 und 3228 E, 5). Ketten und andere biegsame Körper nehmen durch Zentrifugalkraft eine Reihe von Eigenschaften an, die wir den starren Körpern zuschreiben (siehe J. Aitken, Phil. Mag. (5) 5, 81—105, 1878).

Bei der Milchzentrifuge Fig. 3229 [1]) ist das Abbrechen des Milchgefäßes von der Achse unmöglich gemacht dadurch, daß ersteres drehbar auf dem kugelförmigen Achsenende aufsitzt, so daß sich sofort nach Inbetriebsetzung seine stabile Achse mit der Drehachse übereinstimmend richtet.

[1]) Zu beziehen von der Aktiengesellschaft der Hollerschen Carlshütte bei Rendsburg, sowie von A. Stieger, Frankfurt a. M.

Fig. 3229.



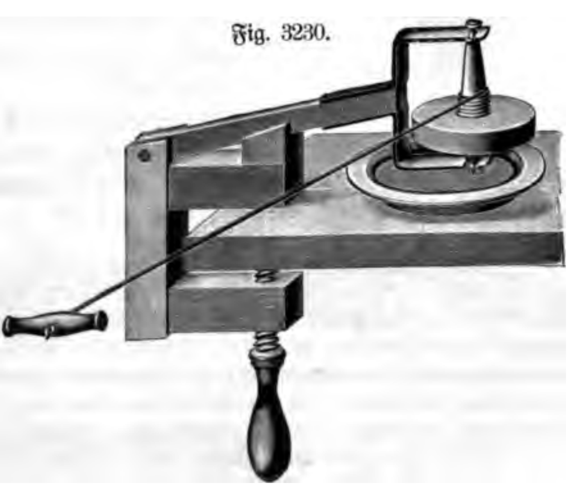


Fig. 3230.

516. Kreisel. Die Stabilität der Achse eines Kreisels läßt sich gut bei dem in Fig. 3230 (E, 36) dargestellten großen Kreisel aus Blei zeigen. Man kann, wenn er, wie angedeutet, durch Abziehen einer aufgewickelten Schnur in Rotation versetzt und der an einer Schraubzwinge angebrachte Halter entfernt ist, ziemlich kräftige Schläge mit einem Holzstab gegen die Achse führen (Vorsicht!), ohne daß er umfällt. Zieht man den auf einer Filzunterlage stehenden Teller (am besten mit einer daran befestigten Schnur) auf dem Tische fort, so bleibt der Kreisel an seinem Orte auf dem Teller

stehen, es genügt also eine sehr kleine Kraft, ihn in horizontaler Richtung zu bewegen [1]).

Knipp (Beibl. 25, 323, 1901) stellt sich einen Kreisel her aus dem Vorderrad eines Fahrrades. Ganz kleine Kreisel kann man sich aus einem Knopf mit durchgestecktem Streichholz herstellen. Eine andere Kreiselform ist eine stehende und um den senkrechten Durchmesser rotierende oder um ihre Achse rollende Kreisscheibe (Münze, Rad, Teller). Bequem sind auch die in Spielwarenhandlungen erhältlichen Kreisel, die sich auf ihrer lose durch eine Büchse geführten Achse drehen können

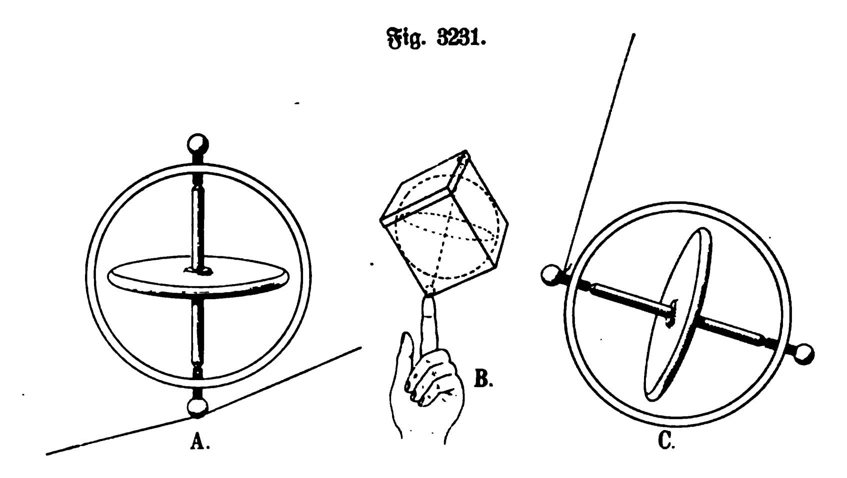
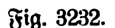


Fig. 3231.

(Fig. 3231 [2]). Vollkommenere Kreisel werden in einem Cardanischen Ringsystem (Fig. 3232) aufgehängt, um sie nach allen Richtungen beweglich zu machen.


Fig. 3232.



Der Satz wird in den Lehrbüchern gewöhnlich so ausgesprochen: Der Kreisel verharrt in seiner Richtung mit einer Kraft, welche mit seiner Masse und der Geschwindigkeit wächst. Dies gibt zu der irrigen Vorstellung Anlaß, ein Versuch, den Kreisel umzustoßen, wecke eine Kraft, welche der die Verschiebung erzeugenden entgegengesetzt ist. In Wirklichkeit ist die geweckte (induzierte) Kraft senkrecht zur Richtung der Verschiebung [3]).

Nach der obigen Art den Satz auszusprechen, könnte man meinen, zur Drehung der Kreiselachse um eine zu ihr senkrechte Achse müsse wegen des auftretenden Widerstandes eine Arbeit notwendig sein, da sich allgemein die Arbeit als Produkt von Widerstand und Verschiebung berechnet.

[1]) Man kann den Kreisel statt mit einer Schnur auch mittels eines beim Anhalten auf die Achse wirkenden Friktionsrades in Drehung versetzen. Die Achse oder das Rad wird dabei zur Vergrößerung der Reibung mit Kautschuk überzogen. — [2]) Solche sind zu beziehen von Wittwar u. Mori, Frankfurt a. M., Fabrik gewerblicher Erzeugnisse. — [3]) Ähnliche (elektrodynamische) Kräfte treten auf, wenn eine Elektrizitätsmenge in der Nähe eines Magnetpols sich verschiebt bezw. wenn ein Strom in der Nähe eines Magnetpols fließt, auch wird in einem Stromleiter, welcher an einem Magnetpol vorbeibewegt wird, Elektrizität in Bewegung gesetzt, eine elektromotorische Kraft induziert. Gerade dieser Analogien halber empfiehlt sich eine eingehendere Betrachtung der Kreiselbewegung.

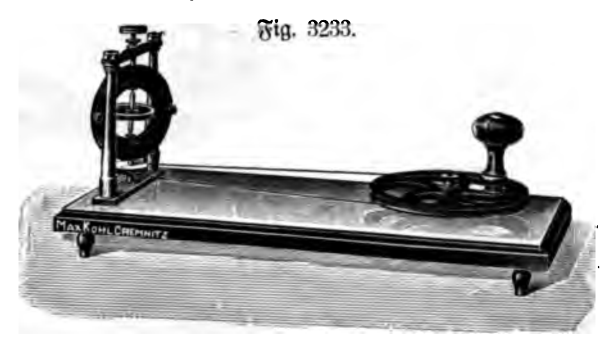
Von besonderem Interesse sind dieselben auch zum Verständnis der Erscheinungen, welche bei Schwungrädern, Dynamomaschinenankern u. s. w. auf Schiffen auftreten.

Macht man nun aber den Kreisel wirklich um eine solche Achse drehbar, wie bei dem Maschinchen Fig. 3233 (K, 40), indem man den innersten Ring horizontal stellt und ihn durch Klemmen aus starkem Messingblech, die mittels der beiden in der Figur sichtbaren Schrauben befestigt werden und zugleich eine Verdrehung der äußeren Ringe hindern, befestigt, so fühlt man beim Drehen des Schwungrades keinerlei Widerstand, wenigstens keinen größeren, als wenn der Kreisel in Ruhe ist. Bringt man das Rad in raschen Lauf und überläßt es dann sich selbst, so setzt es seine Drehung gerade solange fort, wie wenn der Kreisel nicht rotierte.

Da nun nach § 48, S. 698 die Arbeit bei gezwungener Bewegung gemessen wird durch das Produkt von Kraft, Weg und Kosinus des Winkels zwischen den Richtungen beider, so folgt, daß dieser = 0, d. h. der Winkel = 90° sein muß.

Der Widerstand, der sich beim Umlegen der Kreiselachse geltend macht, ist also keineswegs ein solcher, wie er sich etwa beim Verschieben eines Körpers in einer zähen Masse, z. B. Lehm oder Sand, infolge der Reibung geltend macht — dieser Widerstand ist der Verschiebungsrichtung direkt entgegengesetzt und bedingt deshalb einen Arbeitsaufwand —, hier ist vielmehr der Widerstand senkrecht zur Verschiebungsrichtung und macht sich deshalb nur dann geltend, wenn der Kreisel die Möglichkeit hat, sich auch in dieser Richtung zu drehen, was z. B. bei dem Apparat Fig. 3233 dadurch ermöglicht werden kann, daß man die angeschraubten Blechklammern durch kürzere ersetzt, welche dem Kreisel gestatten, sich aufzurichten. Es tritt dann eine momentane Arbeitsleistung ein, die aber sofort aufhört, sobald die Kreiselachse sich senkrecht gestellt hat.

Fig. 3233.



Hindert man das Aufrichten des Kreisels durch ein am beweglichen Ring befestigtes einseitiges Übergewicht, so wird eine um so größere Arbeit geleistet, je größer dieses Übergewicht. Das Resultat der Arbeitsleistung ist aber nicht einfach die Hebung dieses Gewichts, d. h. Vergrößerung seiner potentiellen Energie, denn bei umgekehrter Drehung der Kreiselachse, wobei es sich senkt, ist annähernd die gleiche Arbeit erforderlich. Zur Vermehrung der Rotationsenergie des Kreisels wird dieselbe ebenfalls nicht verbraucht, da das Moment der an der Kreiselachse angreifenden Kraft stets gleich Null ist, somit eine Änderung der Rotationsgeschwindigkeit nicht eintritt.

Die besten Kreisel waren früher zu beziehen von dem Mechaniker F. Carl Schmidt, Dresden, Mathildenstraße 42, dem man auch eine Reihe hübscher Experimente damit verdankt. Heute sind sie bei allen größeren Firmen zu haben. (Einzelne Kreisel 7 bis 12 Mk., vollständige Kollektion von Kreiseln mit Nebenapparaten 90 Mk.)

Um einen Kreisel in Bewegung zu setzen, faßt man ihn mit der linken Hand an der Achse, drückt gleichzeitig mit dem Daumen dieser Hand das Ende einer starken Seidenschnur oder Darmsaite an den Rand des Kreisels, wickelt nun die Saite mit der rechten fest und gleichmäßig auf die Büchse auf und zieht sie dann

kräftig und rasch, indes nicht mit plötzlichem Ruck, sondern vorsichtig anziehend ab. Vor dem Gebrauche wird die Achse mit feinem Maschinenöl eingeölt.

1) Der rasch rotierende Kreisel wird senkrecht auf einen Stahlteller gesetzt, der selbst, um den Gang des Kreisels ruhiger zu machen, auf eine Filzunterlage aufgesetzt ist. Der Kreisel bleibt fast unbeweglich stehen.

2) Einschließen eines sich drehenden Kreisels in eine Hohlkugel aus Blech. Dieselbe besteht aus zwei durch ein Scharnier miteinander verbundenen Hälften, welche innen mit korrespondierenden Lagerschalen zur Aufnahme der Enden der Kreiselachse versehen sind. Man bringt den Kreisel in lebhafte Rotation, legt ihn in die Lagerschalen der einen Hälfte ein, klappt die andere darüber und schließt die Kugel zu. Versucht man sie nun zu drehen, so fühlt man einen Widerstand, als ob die Kreiselachse durch unsichtbare Kräfte in ihrer Lage festgehalten würde. In dem Maße, als sich die Drehungsgeschwindigkeit vermindert, wird der Widerstand geringer und verschwindet ganz, wenn der Kreisel zur Ruhe kommt. (Fig. 3234 Lb, 35.)

Fig. 3234.

Fig. 3235.

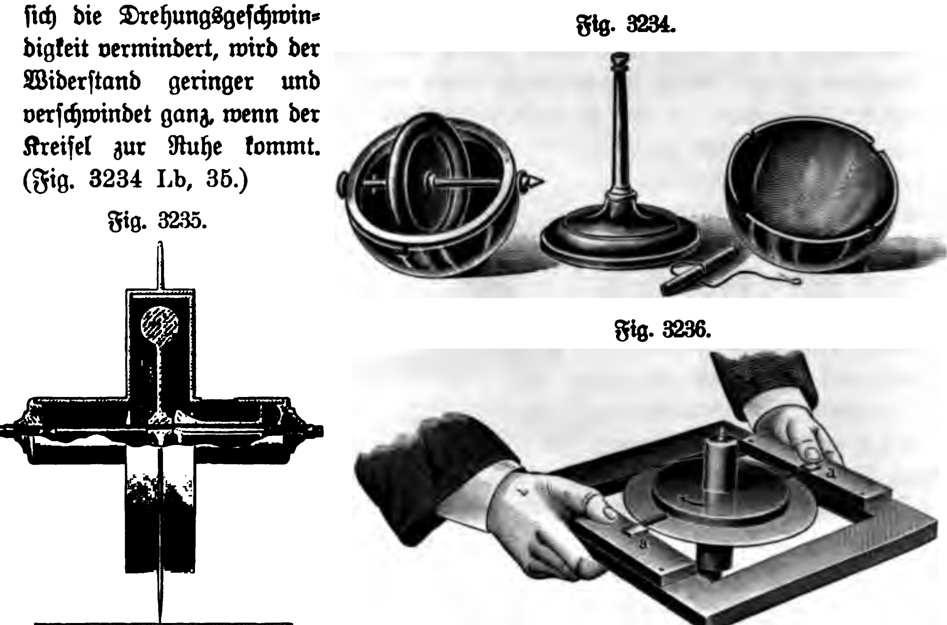


Fig. 3236.

Gray [1]) ersetzt die Hohlkugel durch ein enger anschließendes Gehäuse mit scharfem Rand in der Äquatorialebene (Fig. 3235). Einen solchen Gyrostaten kann man nach Anleitung von Fig. 3236 um eine zur Drehachse senkrechte Achse *aa* rotieren lassen, wodurch ohne weiteres ersichtlich ist, daß keine Widerstandskraft gegen eine solche Rotation auftritt, also auch keine Arbeit geleistet wird. Die auftretende Kraft wird durch die Lager *aa* aufgehoben. Fällt der Schwerpunkt nur nahezu in die horizontale Verbindungslinie der Zapfen, so ist die vertikale Lage der Rotationsachse stabil oder unstabil, je nachdem die Richtung der Bewegung, welche man dem Rahmen in seiner Ebene erteilt, mit oder gegen die Richtung der Rotationsbewegung geht. Dreht man also im Sinne des Pfeils, d. h. der Rotationsrichtung, so bleibt der Gyrostat in Ruhe, kehrt man aber die Bewegungsrichtung um, so dreht sich das Gehäuse in den Zapfen und der Gyrostat kehrt sich um, so daß die Bewegungsrichtung mit der Azimutbewegung in Einklang kommt.

[1]) Gray, Lehrbuch der Physik, Bd. I, S. 275. Braunschweig 1904.

Dreht man nun rückwärts, so legt er sich abermals um u. s. w. Ist die Exzentrizität des Schwerpunkts nur sehr gering, so genügen auch sehr kleine Verschiebungen hin und her, um ihn dauernd in Rotation um die zur Kreiselachse senkrechte Achse *aa* zu erhalten. Dabei wird eine Arbeit von der verschiebenden Kraft geleistet, die durch die Reibungswiderstände, welche sich der Rotation um die Achse *aa* entgegenstellen, aufgebraucht wird, d. h. die Arbeit erzeugt zunächst Bewegungsenergie, die dann durch die Reibung wieder vernichtet wird.

Fig. 3237.

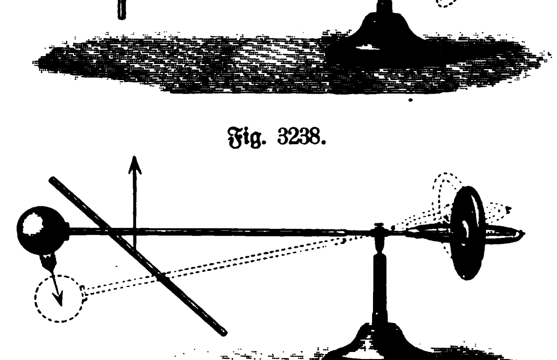


Fig. 3238.

Anstatt die Enden der Achse *aa* hin und her zu bewegen, kann man sie auch auf und ab bewegen. Auch auf diese Weise läßt sich also die hin- und hergehende Verschiebung in eine dauernde Rotation umsetzen.

Sehr auffällig ist das Fundamentalgesetz des Kreisels, daß eine Verdrehung der Achse eine zur Richtung dieser Verschiebung senkrechte Kraft weckt, nach J. J. Thomson zu beobachten bei einem Apparat wie Fig. 3237. Am einen Ende eines auch um eine horizontale Achse drehbaren Wagebalkens ist ein Kreisel angebracht, dessen Achse die Richtung des Wagebalkens hat, am anderen Ende ein Gegengewicht. Schiebt man dieses mittels eines vertikal gehaltenen Glasstabes nach vorn oder hinten, so wird es durch die geweckte Kraft des Kreisels je nach dessen Rotationsrichtung nach oben bezw. unten getrieben oder umgekehrt. Hält man den Glasstab horizontal (Fig. 3238) und drückt den Wagebalken nach oben oder unten, so weicht er infolge der Kraftwirkung gleichzeitig nach vorn bezw. hinten oder umgekehrt aus, und zwar genügt in beiden Fällen schon eine unmerkliche Verschiebung, eine sehr bedeutende Kraftwirkung, d. h. einen beträchtlichen Ausschlag zu erhalten.

Fig. 3239.



3) Fesselsche Maschine (Fig. 3239). Man kann die Rotationsrichtung wechseln oder die Rotation ganz aufheben, je nachdem entweder das Schwungrad durch das Gegengewicht ausbalanciert oder das eine oder das andere überwiegend ist[1]).

4) Zu gleichem Zwecke kann auch der Schmidtsche Kreisel benutzt werden. Der Kreisel wird um 45° geneigt in die konische Vertiefung am Ende eines vertikalen Stabes (Fig. 3240) gesetzt. Er beschreibt einen Kegel und nimmt allmählich infolge der Reibung horizontale Lage an.

Fig. 3240.



Dies ist nicht der Fall, wenn das Stativchen mit einem drehbaren Aufsatz versehen wird, im Gegenteil richtet sich der Kreisel nach und nach auf.

5) Man hängt den Kreisel mittels des Stahlkonus an einer Schnur auf. Die Achse behält jede Neigung, die man ihr gibt, und gleichzeitig beschreibt sie ebenso wie im vorigen Versuch eine Kegelfläche, vorausgesetzt, daß die Schnur keine merkliche Torsion annimmt; andernfalls senkt sich allmählich der Kreisel.

Poggendorffs Erklärung der Präzessionsbewegung ist die, daß, wenn der sich drehende Radkranz durch Drehung der Kreiselachse in ihrer Ebene in schiefe Lage kommt, an einzelnen Stellen desselben die Bewegungsrichtung nicht mehr der anfänglichen parallel ist, somit dort ein Druck auftreten muß, ähnlich wie wenn z. B. ein Eisenbahnzug durch eine Kurve des Geleises genötigt wird, seine Richtung zu ändern. Dieser durch den Zwang geweckte oder induzierte Druck ist derart, daß die von ihm erzeugte Präzessionsbewegung zusammen mit der Bewegung in der neuen Richtung ein Parellelogramm ergibt, dessen Diagonale die ursprüngliche Bewegung darstellt. Er steht dem schon oben erwähnten Fundamentalgesetz entsprechend stets senkrecht zur Richtung der Verschiebung.

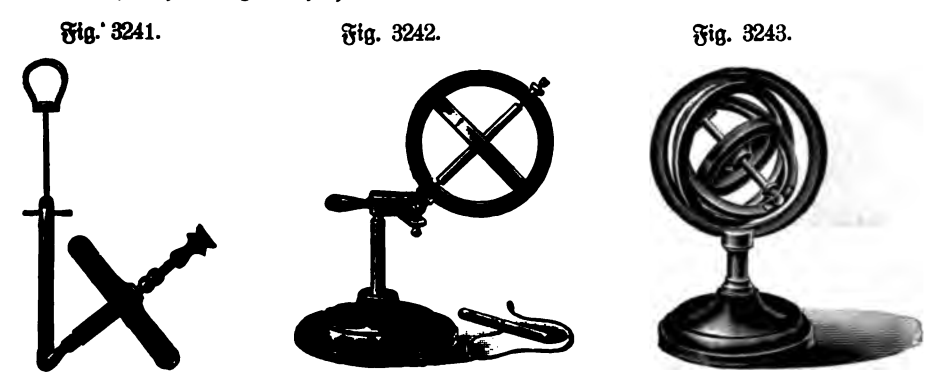
Koppe (Z. 9, 129, 1896) sagt: „Die weitere Durchführung der Kreiselerklärung nach Poggendorff ist ein Labyrinth, aus dem man auch durch verstellbare Modelle mit einzusetzenden roten Pfeilen nicht hinauskommt.“ Er empfiehlt folgende Änderung: „Wird ein Kreisel, dessen Spitze in einem festen Punkte bleibt, in Rotation versetzt um seine wagerechte Achse und dann sich selbst überlassen, so wird durch die Schwerkraft seine Achse um den festen Punkt abwärts gedreht. Sobald sie sich mit einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit verdreht, wird eine Kraft senkrecht zu ihrer augenblicklichen Bewegungsrichtung hervorgerufen nach derjenigen Richtung, nach der sich die Teilchen des Kreisels auf der unteren Seite rotierend bewegen. Dadurch wird die Bewegung abwärts seitlich umgewandt, durch dieselbe Einwirkung wird die Richtung weiter modifiziert, sie wird wagerecht fortschreitend, schräg aufsteigend und schließlich erreicht die Achse in senkrechter Bewegung eine höchste Lage. Diese ist wieder wagerecht, bildet aber mit der ursprünglichen Lage einen gewissen Winkel. Bei großer Rotationsgeschwindigkeit ist die Tiefe, bis zu der die Kreiselachse unter

[1]) Bei Fessel-Magnus' Apparat sind zwei Kreisel an gemeinsamer Achse befestigt.

die wagerechte Ebene der festen Kreiselspitze hinabtaucht, sehr gering, ebenso auch der Winkel, um den sie horizontal fortschreitet; an die erste Bewegung schließt sich sofort eine zweite, die Winkel des Fortschreitens summieren sich, die Oszillationen auf- und abwärts werden durch die Widerstände gedämpft, so daß asymptotisch eine gleichmäßige Präzessionsbewegung entsteht. Die oszillierende Bewegung neben der Präzession heißt Nutation[1]).

6) Heben und Sinken der Rotationsachse bei sich ändernder Präzession. Hierzu dient die Gelenkstange (Fig. 3241 Lb, 20), welche statt des Konus auf die Achse aufgeschraubt wird. Um zu verhindern, daß sich hierbei der Kreisel infolge seiner Rotation losschraube, muß die Schnur beim Abziehen des Kreisels entgegen der Bewegung des Uhrzeigers aufgewickelt werden. Hält man die Gelenkstange fest, so daß der Kreisel gehindert wird, die Kegelfläche zu durchlaufen, so sinkt derselbe. Er richtet sich aber sofort wieder auf, sobald man die Gelenkstange derart dreht, daß die Präzessionsbewegung gefördert wird. Zum bequemen Anfassen ist an derselben ein Querstäbchen angebracht[2]).

Fig.* 3241. Fig. 3242. Fig. 3243.



7) Der Kreisel im Kardanischen Ring, das sogenannte Bohnenbergersche Maschinchen (Fig. 3243 Lb, 27). Weigle konstruierte dasselbe derart, daß auch die Ringe in Rotation versetzt werden können, so daß der Kreisel um drei Achsen zugleich drehbar ist. (Fig. 3233 K, 40.)

Wird das Übergewichtchen nicht aufgelegt, so bleibt die Achse des in rasche Rotation versetzten Kreisels sich immer parallel, wie man auch den Apparat drehen und wenden mag. Sobald aber das Übergewichtchen aufgesetzt ist, so dreht sich die ganze Vorrichtung in der Richtung der Rotation des Kreisels um die vertikale Achse. (Präzession.) Wirkt man dieser Rotation um die vertikale Achse mit der Hand entgegen, oder unterstützt sie, so ändert sich die Richtung der Kreiselachse in dem einen oder anderen Sinne. Um die Nutation zu zeigen, bringt man den

[1]) Über elementare Berechnung der Kraft, weche durch die Verschiebung des rotierenden Kreisels geweckt oder induziert wird, siehe Wanka, Z. 9, 30, 1896. Ist T das Trägheitsmoment des Kreisels bezüglich einer durch die Kreiselachse gelegten Ebene, w seine Winkelgeschwindigkeit und c die Winkelgeschwindigkeit, mit welcher die Kreiselachse verdreht wird, so ist das induzierte Drehmoment $= T . w . c$. — [2]) Einen anderen Apparat zu gleichem Zwecke zeigt Fig. 3242 (Lb, 30). Um den Kreisel am Herunterfallen zu hindern, ist er mittels einer Achse mit feiner Spitze in das Stativ gelagert. Ein kleiner Schieber gestattet nach dem Abziehen den Kreisel frei zu geben. An dem Ringe ist ein Griff angebracht, um die Drehungsgeschwindigkeit der Ringe vergrößern oder verkleinern und dadurch die Achse des Kreisels heben oder senken zu können.

Kreisel mit aufgelegtem Gewichtchen in Drehung und gibt der Achse eine geneigte Lage. Wenn die Rotation keine zu rasche mehr ist, übt man auf den inneren Kreis in der Nähe des Gewichtchens einen schwachen Schlag aus. Man sieht dann die Enden der Kreiselachse Ellipsen beschreiben.

8) Die Wirkung des Kurvenkreisels (Fig. 3244) ergibt sich nach Koppe (Z. 4, 80, 1890) einfach aus der Betrachtung, daß das Achsenende sich auf der Kurve abrollt, somit eine Kraft senkrecht zu dieser Verschiebung längs der Kurve weckt, welche nach dem Fundamentalsatz senkrecht zur Kurve gerichtet ist, also die Achse beständig gegen diese andrückt.

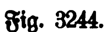

Fig. 3244.



Fig. 3246.

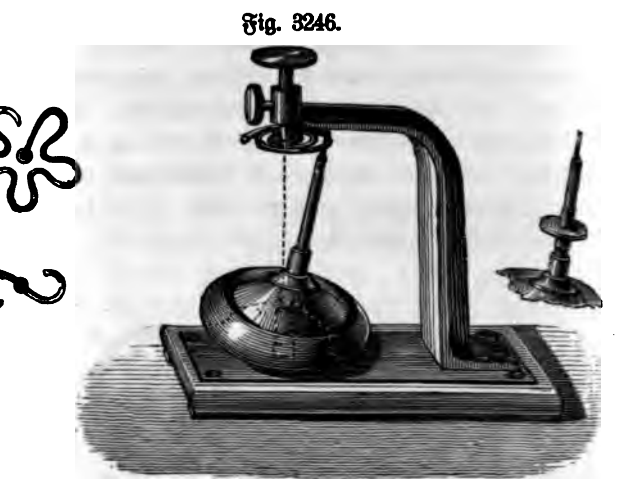


Fig. 3245.

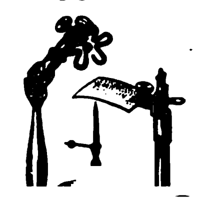
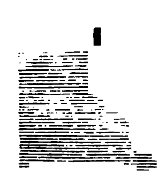
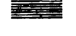


Fig. 3247.







9) Das Nutoskop (Fig. 3245) besteht in der ihm von Zenger gegebenen Form aus einem konischen Kreisel, welcher mittels einer feinen Stahlspitze auf einer niedrigen Säule in stabiler Gleichgewichtslage aufgestellt ist. Wird derselbe in Rotation versetzt und aus der Gleichgewichtslage abgelenkt (durch ein kleines Laufgewicht an einem Seitenarm der Achse), so beschreibt das obere zugespitzte Ende der Achse eine Spirale. In ein nebenstehendes Stativ wird ein Blatt berußtes Papier eingeklemmt, auf welchem diese Kurve sehr exakt und sicher durch die Spitze der Achse verzeichnet wird. Um den Kreisel in Rotation zu versetzen, wird der bewegliche Arm, welcher links in der Figur zu sehen ist, so niedergedrückt, daß die Schraube desselben die Spitze der Achse berührt und nun die bereits auf die Achse aufgewickelte Schnur abgezogen. Alsdann wird der Arm wieder zurück-

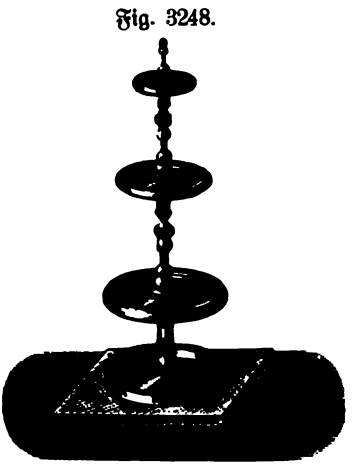
gebogen. Befestigt man an dem Arm, wie aus der Figur ebenfalls zu ersehen ist, verschiedene aus Blech ausgeschnittene Kurven (S, Zykloide, Spirale u. s. w.) und biegt denselben dann so herunter, daß die Spitze die Blechschablone 2 bis 3 mm überragt, so läuft die Spitze genau dem inneren und äußeren Rande dieser Figur nach, d. h. der Kreisel wirkt als Kurvenkreisel wie Fig. 3246 (Lb, 60). Eine Vorrichtung zum Abziehen des Kreisels zeigt Fig. 3247 (Lb, 55).

Knipp (Beibl. 25, 323, 1901) benutzt das Vorderrad eines Fahrrades zur Erläuterung der Prinzipien des Gyroskops. Indem man die Gabel an eine Stange anschraubt und diese wie ein Pendel aufhängt, kann man namentlich die oszillatorische Bewegung der Achse weithin sichtbar darstellen.

Sehr auffallend ist die bedeutende Kraft, welche erforderlich ist, das umlaufende Rad mit seiner Gabel mit der Hand zu drehen. Dasselbe steigt dabei in die Höhe, so daß man es mit ausgestrecktem Arm halten kann, wenn man sich gleichzeitig dreht. Befestigt man die Stange mit Gabel und Rad drehbar um sich selbst auf einem ebenfalls um seine Achse drehbaren Stativ und bewirkt die Drehung um die eine oder andere Achse durch eine mit Gewichten belastete Schnur, so beobachtet man im ersten Falle bedeutenden Widerstand gegen die Drehung und ruckweises Abrollen der Schnur, bei Drehung um die Achse des Stativs Drehung des Rades, bis es der Rotationsebene parallel wird.

Bringt man das Rad zentrisch oder exzentrisch in eine Schere, welche in einem Gestell zwischen zwei Spitzen läuft, so daß die Drehungsachse in der Ebene des Rades liegt, so kann es auch bei schnellstem Lauf durch ein kleines Gewicht, welches an einer um die Achse gewickelten Schnur zieht, in beschleunigte Umdrehung um diese (zur Radachse senkrechte) Achse gebracht werden, ebenso wie wenn es nicht rotierte.

Fig. 3248.



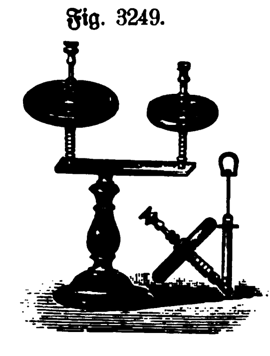
Nach Gill (Z. 16, 289, 1903) kann man die Nutation zeigen mit einem Kreisel, welcher nicht vollständig ausbalanciert ist, z. B. einem kleinen Rade aus einem Uhrwerk, das sich auf einer berußten Glasplatte bewegt. Die gezeichnete Kurve besteht aus zykloidenartig aneinander gereihten Kreisen und zeigt in ihrem ganzen Verlaufe eine feine Kräuselung, die man durch Projektion sichtbar machen kann.

10) Drei verschieden große Kreisel, von welchen der größte und mittlere oben mit konischen Höhlungen versehen sind. Man stellt zunächst den größten auf den Stahlteller (Fig. 3248), zieht den kleinen so ab, daß er in gleichem Sinne rotiert wie dieser, und setzt ihn in dessen Höhlung. Derselbe stellt sich immer vertikal, selbst wenn man ihn horizontal aufsetzte. Rotiert er dagegen entgegengesetzt, so stellt er sich immer horizontal, selbst wenn man ihn vertikal aufsetzte. Man muß dabei darauf achten, daß der Kreisel nicht zu Boden fällt, da er hierdurch beschädigt wird und auch rasch fortrollend Unheil anrichten könnte. Droht er herabzufallen, so faßt man ihn fest mit der Hand oder besser mit beiden Händen. Sollen alle drei Kreisel aufeinander gestellt werden, was einige Übung erfordert, so darf der kleine nicht zu schnell rotieren.

Ein auf rauher Ebene frei beweglicher, schief aufgesetzter Kreisel hat stets die Tendenz sich aufzurichten. Ein auf schiefer Ebene rotierender Kreisel beschreibt auf dieser Cykloidenranken, die man nach Koppe (Z. 4, 82, 1890) sichtbar machen kann, wenn man die Ebene vor dem Versuche mit feinem Mennigepulver bestreut, welches durch die Kreiselspitze an allen Punkten ihrer Bahn fest angedrückt wird, so daß es sich nicht mehr wegblasen läßt. Alle diese Wirkungen erklären sich durch den Einfluß der Reibung auf die Präzessionsbewegung, eine genaue Ableitung ist aber sehr umständlich.

11) Ein Messingstab ist mit drei gleich weit abstehenden Löchern versehen. Mittels des mittleren wird er auf die Spitze eines Stativs gestellt, in die beiden anderen steckt man gleich große Kreisel, deren Kugeln man durch angeschraubte Zapfen ersetzt hat. Rotieren die Kreisel in gleichem Sinne, so dreht sich der Messingstab um die Achse des Stativs, rotieren sie entgegengesetzt, so bleibt er stehen [1]). Fig. 3249 zeigt den Versuch mit verschieden großen Kreiseln in ungleichen Abständen.

Fig. 3249.



12) Die Doppel-Rotationsscheibe. Dieser von Gruey (1878) konstruierte Apparat [2]) gleicht dem Bohnenbergerschen Maschinchen. An dem obersten Punkte des äußeren Ringes ist ein Stab senkrecht zum Ringe befestigt, dessen freies Ende dadurch hin- und herbewegt wird, daß man es in einer wellenförmigen Rinne einer rotierenden Trommel gleiten läßt. Infolgedessen dreht sich der innere Ring um den Durchmesser, an dessen Enden er befestigt ist, nahezu gleichmäßig, vorausgesetzt, daß die Bewegungsrichtung des Stabes jeweils in dem Momente sich ändert, in welchem die Achse des Kreisels vertikal steht, was man durch passende Regulierung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel leicht erreichen kann. Die Hin- und Herbewegungen des Stabes sind dabei so gering, daß sie das Auge kaum erkennen kann. Der Versuch ist namentlich insofern von Interesse, als man die Rotation dazu benutzen könnte, ein Gewicht aufzuwinden, also Energie aufzuspeichern, welche natürlich der Arbeit zur Erzeugung der Oszillationen entspricht. Man ersieht hieraus deutlich, daß die Arbeit, welche zur Überwindung des Kreiselwiderstandes (der induzierten Kraft) verbraucht wird, dazu dient, den Kreisel um die zur Kreiselachse senkrechte Achse zu drehen, also zunächst als Bewegungsenergie wieder zum Vorschein kommt, die aber alsbald durch die Reibungswiderstände aufgebraucht wird. Die Rotationsgeschwindigkeit des Kreisels ändert sich nicht.

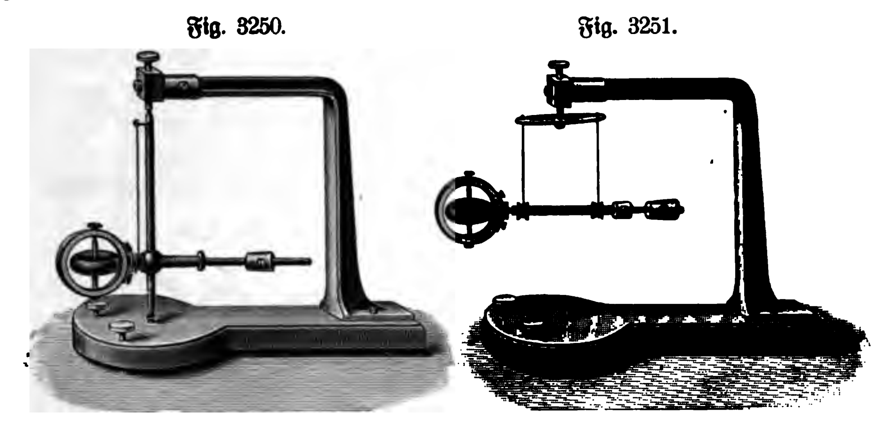
13) Der alternierende gyroskopische Drehbaum (gleichfalls von Gruey [1878] konstruiert). Durch eine vertikale drehbare Säule ist horizontal drehbar ein Stab hindurchgeführt, an dessen einem Ende ein Ring mit Kreisel befestigt ist, so daß die Achse des letzteren senkrecht zu der des Stabes steht, während am anderen Ende eine Trommel angebracht ist, die durch einen aufgewundenen gespannten Kautschukfaden in Umdrehung gesetzt wird. Der Stab dreht sich ungleichmäßig und oszilliert gleichzeitig um die Achse der Säule, wobei jedesmal die

[1]) Die Kreisel werden angefertigt von Dr. Houdek u. Hervert in Prag. Preis 35 fl., mit optischen und akustischen Nebenaparaten 58 fl. — [2]) Zu beziehen von Ducretet u. Cie., Paris, Rue Claude Bernard 75.

Bewegungsrichtung sich ändert, wenn die Drehgeschwindigkeit ein Minimum wird. Beides tritt ein, wenn die rotierende Scheibe in vertikale Stellung kommt [1]). (Fig. 3250 Lb, 100.)

Der Kautschukfaden kann auch durch das eigene Gewicht ersetzt werden. (Fig. 3251 Lb, 100.)

Fig. 3250. Fig. 3251.



14) Apparat zum Beweise, daß Rotationsbewegungen fortschreitende Bewegungen erzeugen können, nach Sire [2]) (Fig. 3252 Lb, 30). Wird die Schwungmaschine in Drehung versetzt, ohne daß die Scheibe rotiert, so entfernt sich diese letztere, gleich einem Zentrifugalpendel. Versetzt man dagegen die Scheibe in schnelle Rotation, und dreht die Schwungmaschine, so wird das Pendel nach außen oder nach innen abweichen, je nach dem Drehungssinne. Dreht man das Stativ mit dem Pendel um 90°, so wird die Scheibe, je nach dem Sinne der Drehung, der Bewegung des Armes entweder voraneilen oder hinter ihr zurückbleiben.

Fig. 3252.

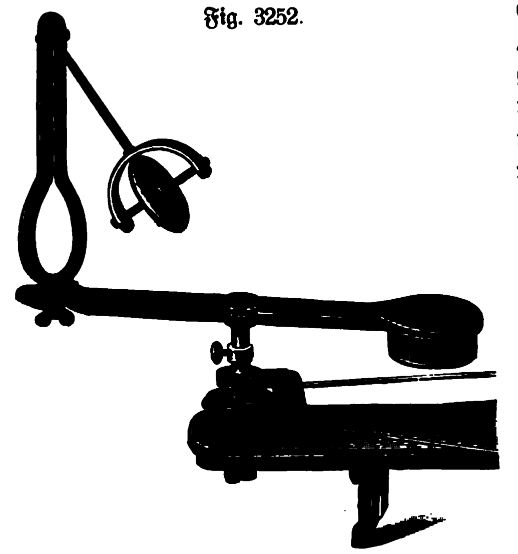


Fig. 3253.

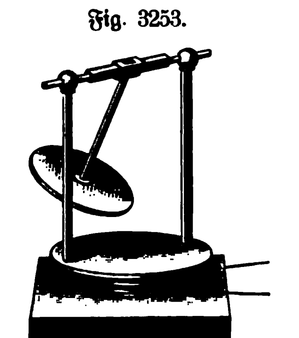


Fig. 3253 stellt einen in Verbindung mit der Schwungmaschine zu gebrauchenden Apparat zur Demonstration des gleichen Prinzips nach Koppe dar. Der drehbare Arm mit dem rotierenden Kreisel hat bei Betätigung der Schwungmaschine

[1]) Gruey, Théorie élémentaire des Gyroscopes 1879. — [2]) Beschrieben in Secchi, „Einheit der Naturkräfte“, Deutsch von Schulze, 2. Aufl., Braunschweig 1891, S. 217.

das Bestreben, einen Kegelmantel mit sternförmiger Basis zu beschreiben nimmt aber bald, infolge der beim Steigen und Fallen auftretenden Reibung seine endgültige Gleichgewichtslage in der nach abwärts gerichteten Vertikalen an [1]).

15) Polytrop nach Sire (Fig. 3254 Lb, 250) zu den Versuchen über, die Zusammensetzung mehrerer Rotationen und über den Einfluß, den die Drehung der Erde in den verschiedenen Breiten auf sich drehende Körper ausübt. Der rotierende Körper stellt sich so ein, daß seine Rotationsachse in die Meridianebene fällt und sich in demselben Sinne dreht wie die Erde (Bestimmung des Ortsmeridians) und zwar um eine zur Erdachse parallele Achse.

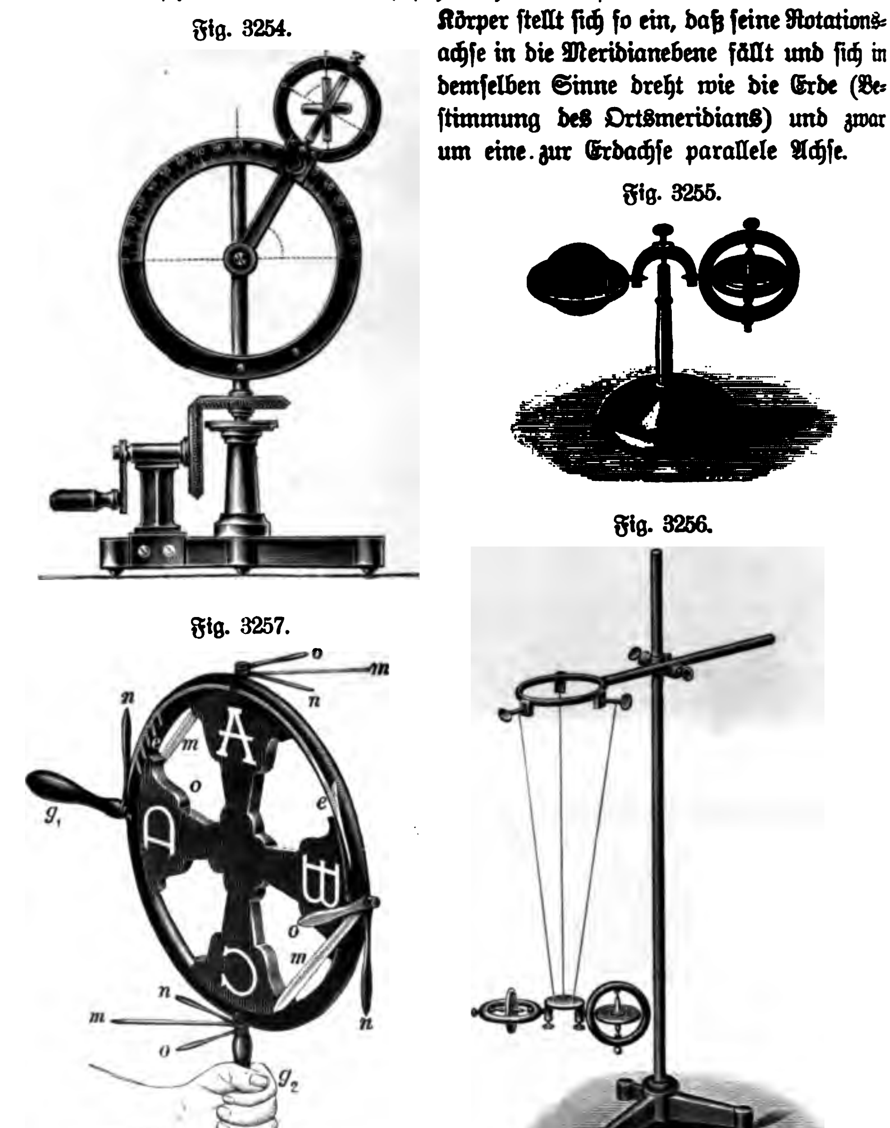


Fig. 3254.

Fig. 3255.

Fig. 3256.

Fig. 3257.

16) Eine Kombination von zwei Kreiseln (Fig. 3255 und 3256) ermöglicht nach Wanka (Z. 11, 235, 1898) zu zeigen, daß ein solcher Apparat eine

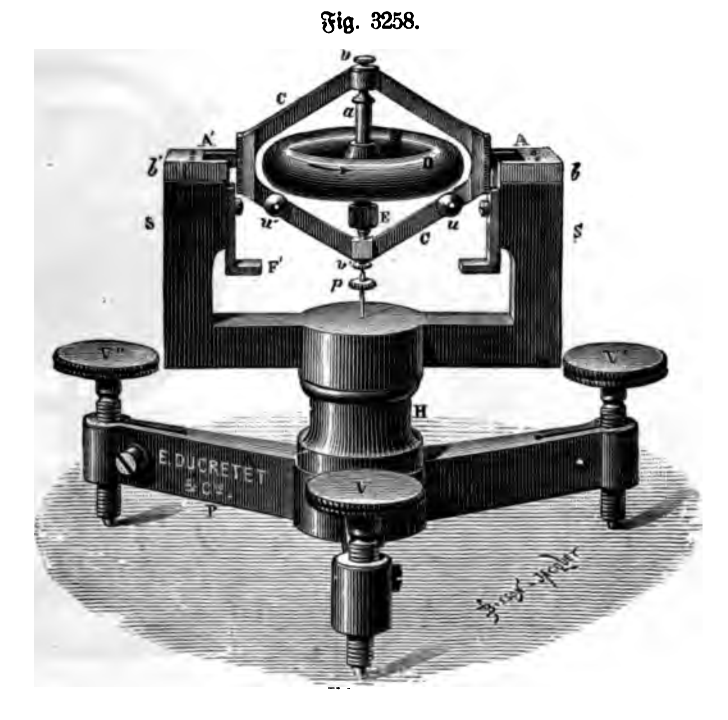
[1]) Bezüglich der näheren Erklärung siehe Koppe, Z. 4, 70, 1890.

wagerechte Gleichgewichtslage hat, aber wenn er aus dieser herausgedreht wird, in Schwingungen gerät [1]). Über die Versuche, welche sich mit dem Apparate anstellen lassen, sei verwiesen auf das zitierte Referat [2]).

517. **Erdrotation.** Am einfachsten dient zum Nachweis der Erdrotation Foucaults Gyroskop [3]) oder Rotaskop. Zur Erklärung desselben kann man einen Kreisel mittels eines Seidenfadens an dem Gestell Fig. 3324, S. 1297, aufhängen.

Ein Modell zur Erklärung des Foucaultschen Gyroskop- und Pendelversuchs nach Hartl (Fig. 3259) liefern W. J. Rohrbecks Nachf., Wien I, Kärntnerstr. 59, zu 10 Kronen. Man steckt dabei das Gyroskop bezw. Pendelmodell auf die zweite

Fig. 3258.



Meridianebene in solcher Stellung, daß seine Rotations- bezw. Schwingungsebene mit der des entsprechend stehenden Gyroskop(Pendel-)modells auf der ersten Meridianebene übereinstimmt. Am Äquator ergibt sich dabei keine Verdrehung der Rotations-

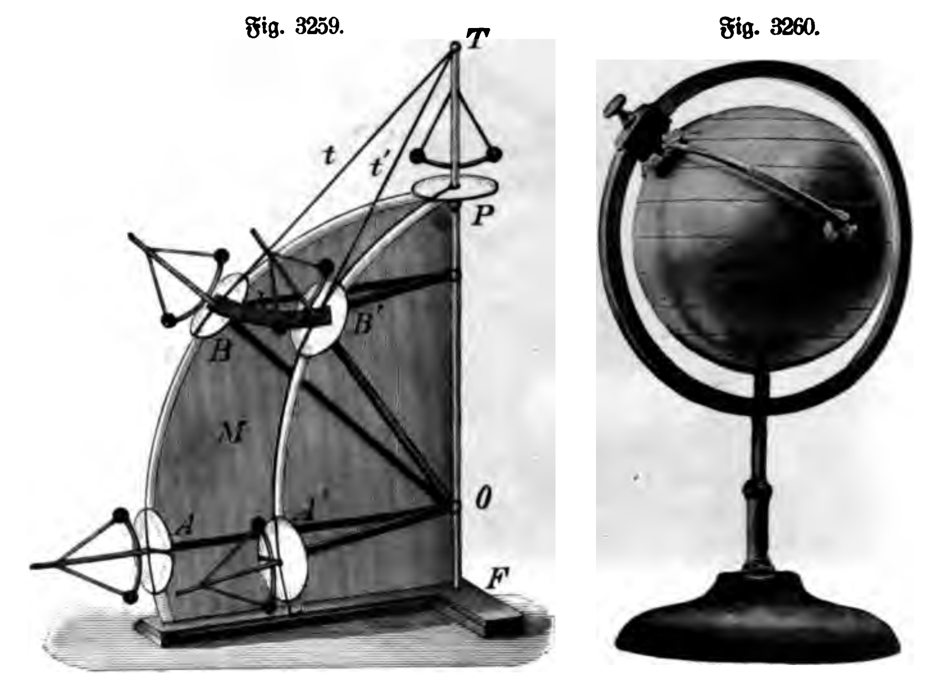
[1]) Zu beziehen von Lenoir u. Forster, Wien, Waaggasse 5, für 30 fl. — [2]) Ein Modell zur Erklärung der Haupterscheinungen am Gyroskop (Kreisel) beschreibt Hammerl (Z. 6, 68, 1892), Fig. 3257. Dasselbe ist zu beziehen von Mechaniker Lütscher in Innsbruck. Siehe auch: Klein u. Sommerfeld, Über die Theorie des Kreisels (Leipzig 1898, B. G. Teubner) und M. Koppe, Z. 7, 186, 1894. Siehe auch Greenhill, Die mathematische Theorie des Kreisels, Beibl. 28, 1237, 1904. Gallop, Über das Aufrichten eines sich drehenden Kreisels, ebd. 1238 und Webster, The Dynamics of particles and of rigid, elastic and fluid bodies, Leipzig 1904, Teubner. Über den wirklichen Nachweis der Erdrotation mittels des Geotroposkops siehe Föppl, Physik. Zeitschr. 5, 416, 1904. — [3]) Ein Barogyroskop nach Gilbert (Compt. rend. 94, 199, 1882) zum Nachweis der Drehung der Erde liefern zum Preise von 700 Frks. E. Ducretet u. L. Lejeune, Paris, Rue Claude Bernard 75. (Fig. 3258.)

(Schwingungs-)ebene gegen den Meridian, am Pol entspricht die Verdrehung genau dem Winkel zwischen beiden Meridianen.

W. Schmidt (Z. 17, 355, 1904) konstruierte zu gleichem Zwecke den Apparat Fig. 3260[1]). Wird der Globus um eine vertikale Achse gedreht und die Klemme an dem äußeren Reif so gestellt, daß die Enden der beiden federnden Quadranten den Äquator berühren, so drehen sich diese bei einer Umdrehung natürlich ebenfalls einmal um, dagegen gar nicht, wenn die Klemme um 90° versetzt wird. Für eine Zwischenstellung, etwa den Winkelabstand φ vom Äquator, ist die Drehung gleich der der Kugel multipliziert mit $\sin \varphi$.

Ein weiterer Beweis für die Umdrehung der Erde ist die Abweichung von der Lotrichtung beim freien Fall, da der fallende Körper in der Anfangslage

Fig. 3259. Fig. 3260.



größere Geschwindigkeit hatte als der Erdboden, somit diesem in der Richtung nach Osten hin vorauseilt, z. B. am Äquator bei einer Fallhöhe von 158,5 m um 43,6 mm.

Eine andere Erscheinung, welche die Rotation der Erde beweist, ist die Ebbe und Flut, dadurch bedingt, daß das Wasser der Meere an der dem Monde zugewandten Seite infolge der stärkeren Gravitationskraft sich ansammelt und ebenso auf der abgewandten Seite, da die Erde in der Wasserhülle stärker als jene entfernteren Wassermassen gegen den Mond gezogen wird. Infolge der Drehung der Erde müssen die erhöhten und vertieften Stellen der Meeresoberfläche beständig ihren Ort wechseln. Die Hochfluten oder Springfluten treten bei Neu- und Vollmond ein, die niedrigsten oder Nippfluten beim ersten und letzten Viertel. Durch die Reibung des Wassers an der Erde wird die Rotation der Erde vermindert, die Tageslänge nimmt in 2000 Jahren um 0,01197 Sekunden zu.

---

[1]) Zu beziehen von Lenoir u. Forster, Wien IV, Waaggasse 5, zu 38 Kronen.

518. Gestalt der Erde. Ein elastisch oder unelastisch deformierbarer Körper muß unter dem Einfluß der Zentrifugalkräfte der einzelnen Massenteilchen seine Form ändern. Dies gilt insbesondere für die Erde, bei welcher hauptsächlich die Schwere der Zentrifugalkraft entgegenwirkt. Durch das Zusammenwirken beider Kräfte erklärt sich die Tatsache, daß der Erdradius nicht überall den dem Umfang von 40 000 000 m entsprechenden Wert hat, vielmehr der Abstand der Pole um $^1/_{297}$ kleiner ist als der Durchmesser des Äquators. Die Form ist die eines Sphäroids, der Radius einer Kugel von gleichem Inhalt beträgt 6 367 400 m.

Zum Nachweis, daß die Zentrifugalkraft eine solche Abplattung hervorzubringen strebt, kann man eine Kugel aus elastischen Reifen, wie Fig. 3261, welche bei *h* lose auf der Achse *x* verschiebbar ist, mittels der Schwungmaschine in Umdrehung versetzen. Auch eine in einem Netz an Schnüren hängende Kugel aus plastischem Lehm eignet sich zu dem Versuche. Fig. 3262 (E, 155 bis 170) zeigt einen Apparat für elektrischen Betrieb.

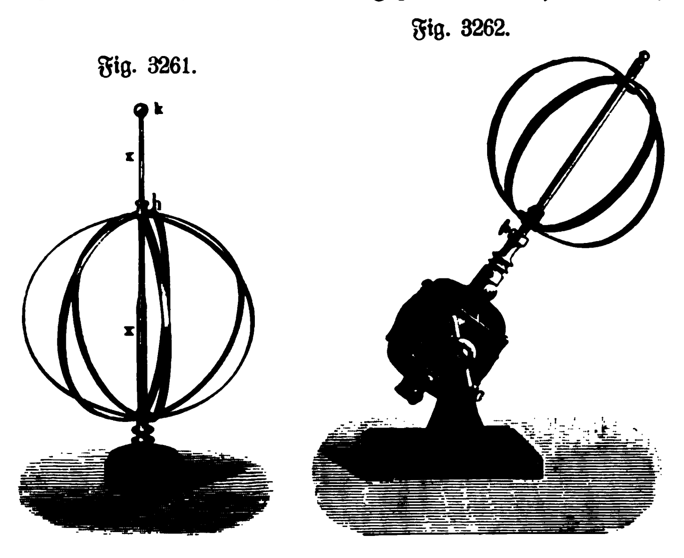


Fig. 3261. Fig. 3262.

519. Veränderlichkeit der Schwerkraft. Da die Masse der Erde in ihrem Schwerpunkt, d. h. dem Mittelpunkt des Sphäroids, konzentriert gedacht werden kann, muß nach dem Gravitationsgesetz (S. 736) die Schwere eines Körpers an den Polen größer sein als am Äquator. Dies ist auch, wie schon früher (S. 728) bemerkt, der Fall, indes ist die Verschiedenheit der Abstände vom Erdmittelpunkt nicht die einzige Ursache. Es kommt weiter hinzu die Verminderung der Schwere durch die entgegenwirkende Zentrifugalkraft. Dieselbe beträgt am Äquator, wo sie in radialer Richtung genau entgegen der Schwere wirkt, da dort die Geschwindigkeit $v = 464$ m/sec, der Erdradius $= 6\,366\,200$ m und $g = 9{,}781$, $K = \frac{m v^2}{r} = \frac{p \,.\, 464^2}{9{,}781 \,.\, 6\,366\,200} = \frac{p}{291}$. Tatsächlich ist aber die Verminderung der Schwere am Äquator größer, nämlich $^1/_{189}$. Der Rest entspricht dem größeren Abstande.

Da die Zentrifugalkraft in einer Ebene senkrecht zur Erdachse wirkt, ist sie im allgemeinen der Schwere nicht direkt entgegengesetzt. Dies kommt zum Ausdruck darin, daß ein Senkblei sich nicht genau in der Richtung des Erdradius einstellt (Lotabweichung), ebenso darin, daß der Spiegel einer ruhenden Flüssigkeit (Quecksilberhorizont) nicht genau senkrecht zum Erdradius ist, wie man nach dem früher gesagten erwarten sollte.

Die tatsächliche Abhängigkeit der Schwere von der geographischen Breite ist gegeben durch die Formel $g = 978{,}00\,(1 + 0{,}005\,31 \sin^2 \varphi)$ cm/sec². Sie läßt sich

auf Grund des früher gefundenen spez. Gewichts der Erde, 5,527, unter der Annahme, der Kern habe etwa das spez. Gewicht 8, mit ziemlicher Annäherung ableiten.

Auf die Veränderlichkeit der Schwerkraft muß auch bei Bestimmung eines Barometer- oder Manometerstandes Rücksicht genommen werden, da bei bestimmtem Gasdruck (Bar, Dynen pro qcm) die entsprechende Quecksilbersäule um so höher ausfällt, je geringer die Intensität der Schwerkraft. Man muß den beobachteten Barometerstand mit $1 - 0,0026 \,.\, \cos 2\varphi - 0,0000002 \,.\, H$ multiplizieren, um den Stand zu erhalten, welcher dem Luftdruck unter 45° am Meeresspiegel entspricht. φ bedeutet dabei die geographische Breite, H die Höhe des Ortes über dem Meeresspiegel in Metern.

Eine normale Atmosphäre entspricht dem Druck von 760.13,596 = 10330 kg pro qm = 1013200 Dynen pro qcm (Bar).

Merkwürdigerweise zeigt sich auch eine Veränderlichkeit der Gravitation mit der Zeit. Nach K. R. Koch (Ann. d. Phys. 15, 146, 1904) betrug in Stuttgart im Juni 1900 die Fallbeschleunigung 980, 915, im März 1904 980, 918, wenn man annimmt, daß die von Haid in Karlsruhe bestimmte Fallbeschleunigung 980, 982 konstant geblieben sei.

520. **Präzession.** Infolge der Abplattung kann die Erde betrachtet werden als Kugel mit einem auf den Äquator aufgelegten Wulst, welcher also unter $23^1/_2$ Grad gegen die Ebene der Erdbahn (Ekliptik) geneigt ist. Die Sonne sucht ihn in diese Ebene zu ziehen, die Folge ist, daß die Erdachse in 25600 Jahren (dem sog. platonischen Jahr) einmal, eine Kegelfläche beschreibend, um die Achse der Ekliptik umläuft oder der Weltpol (auf dem Polarkreis) um den Pol der Ekliptik. Eine weitere Folge ist, daß die Durchschnittspunkte der Ekliptik und des Äquators die Tag- und Nachtgleichen(Äquinoktial-)punkte (Frühlings- und Herbstpunkt), so genannt, weil Tag und Nacht gleich lang sind, wenn die Sonne dort steht, in 25600 Jahren von Osten nach Westen vorrücken, also jährlich 50″. Aus den Sternbildern, in welchen die Äquinoktialpunkte in früheren Zeiten lagen, kann man deshalb leicht historische Daten mit Genauigkeit ermitteln. Da die Anziehung der Sonne auf den Wulst nicht gleichmäßig, z. B. in den Äquinoktialpunkten = 0 ist, entsteht eine Ungleichmäßigkeit der Präzession, die Nutation[1]).

521. **Gravitation.** Newton (1666) kam zuerst auf den Gedanken, die Zentripetalkraft, welche den Mond nötigt, die Erde zu umkreisen, sei seine Schwere. Nennt man die Fallbeschleunigung in der Entfernung des Mondes = 384000000 m g', so ist das Gewicht des Mondes, wenn m seine Masse, $= m \,.\, g'$. Dieses muß gleich der Zentripetalkraft $4\pi^2 \cdot \frac{m \,.\, r}{t^2}$ sein. Nun beträgt die Umlaufszeit des Mondes etwa 28 Tage = 28.24.60.60 = 2419200 (genauer 2360580) Sekunden, somit ist $g' = 4 \,.\, 3{,}14^2 \,.\, \frac{384\,000\,000}{2\,360\,580^2} = 0{,}00305$ m/sec². Da nun die Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche = 9,81 beträgt, ist erstere nur 0,00031 der letzteren. Da ferner der Erdradius = 6367400 m, ist das umgekehrte Verhältnis der Quadrate der Abstände vom Erdmittelpunkt = 0,00031, also der Theorie entsprechend das-

[1]) Über einen Apparat zur Erklärung der Präzessionsbewegung der Erde siehe auch Gray, Lehrbuch der Physik, Bd. I, S. 288, Fig. 147. Braunschweig 1904.

selbe. Ähnlich wie die Bewegung des Mondes um die Erde läßt sich auch die der Erde, sowie der anderen Planeten um die Sonne erklären[1]).

522. Planetenbewegung. Die Planeten bewegen sich, wie Kepler bereits vor Entdeckung des Gravitationsgesetzes gefunden hat, in Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht, und zwar nicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, sondern in Sonnennähe (Perihel) schneller als in Sonnenferne (Aphel), derart, daß vom Radiusvektor (Leitstrahl) in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume durchlaufen werden. Die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten sich wie die Kuben der großen Achsen. Alle diese Gesetzmäßigkeiten beruhen darauf, daß bei der Bewegung nicht, wie bei der bisher betrachteten einfachen Kreisbewegung, die Zentripetalkraft konstant bleibt, sondern, dem Gravitationsgesetze entsprechend, sich umgekehrt mit dem Quadrat des Abstandes ändert.

523. Feldintensität. Die Umgebung des anziehenden Körpers, in welcher sich die Gravitationskraft noch fühlbar macht, nennt man das Gravitationsfeld. Ist die Masse des anziehenden Körpers m_1 (Hyl, Gramm), die des angezogenen m und der Abstand r_1 (Meter, cm), so ist die Kraft $K = f \cdot \frac{m_1}{r_1^2} \cdot m$ (Kilogramm, Dynen), wenn f die Gravitationskonstante (vgl. S. 736) bedeutet. Ist $m = 1/f$, so wird $K = m_1/r_1^2$. Diese Kraft auf die Masse $1/f$ heißt Feldintensität oder Feldstärke[2]). Sie sei $= H$, also $m_1/r_1^2 = H$ und $K = f . H . m$. Die Kraftrichtung, welche durch die Kraftlinien gegeben wird, ist an allen Stellen radial. Um nun durch die Kraftlinien nicht nur die Richtung, sondern auch die Stärke des Feldes zum Ausdruck zu bringen, zeichnet man nur einzelne Kraftlinien, und zwar in solchen Abständen, daß die Zahl der durch die Flächeneinheit (1 qm, qcm) der die Kraftlinien senkrecht durchsetzenden Fläche (Niveaufläche, vgl. S. 726) hindurchgehenden, gleich der Feldintensität ist. Da die Oberfläche einer Kugel im Abstand $r_1 = 4\pi r_1^2$ ist, gehen durch diese $4\pi r_1^2 . H = 4\pi r_1^2 . \frac{m_1}{r_1^2} = 4\pi m_1$ Kraftlinien. Diese gehen sämtlich von der Masse m_1 aus, somit von der Masseneinheit (Hyl, Gramm) 4π. Würde sich der Körper auf einer rauhen Fläche der Gravitationskraft folgend bewegen, so würde er der Kraftlinie, auf welcher er sich befindet, folgen. In einem Medium ohne Reibung oder ähnliche widerstehende Kräfte schießt er vermöge der Trägheit über die Kraftlinien hinaus und beschreibt, wie ein Planet oder Komet, eine Ellipse, Parabel oder Hyperbel.

524. Dreikörperproblem. Wird das Gravitationsfeld von zwei anziehenden Massen m_1 und m_2 in den Abständen r_1 und r_2 von m erzeugt, so ist nach dem Satz vom Kräfteparallelogramm die Resultierende so gerichtet, daß sie mit r_1 und r_2 Winkel bildet, die α_1 und α_2 sein sollen, und ihre Größe ist bestimmt durch die Gleichung

---

[1]) Die Gravitationskonstante wäre 1 CGS, wenn zwei Massen von je 1 g im Abstande 1 cm sich anziehen würden mit der Kraft 1 Dyne. — Unter astronomischer Krafteinheit versteht Chwolson (Lehrb. d. Physik, Bd. I, S. 209. Braunschweig 1902) diejenige Kraft, mit welcher sich zwei Grammstücke in 1 cm Abstand anziehen. Sie ergibt sich aus dem Gravitationsgesetz $= 1/_{14\,950\,000}$ Dyne. — [2]) Im CGS-System bezieht man die Feldstärke auf die Masse 1 g, so daß $H = f . m_1/r_1^2$ Dynen pro Gramm wird.

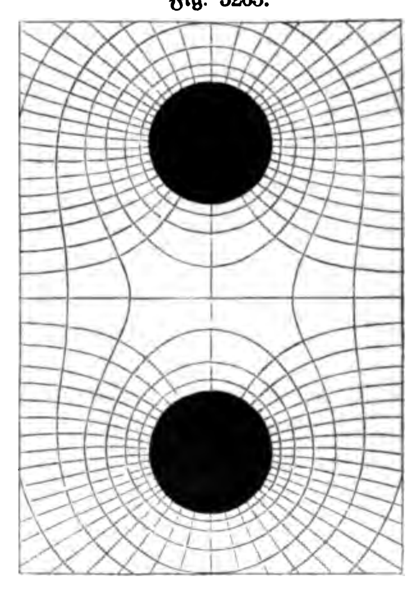
$$K = f \cdot \frac{m_1}{r_1^2} \cdot \cos\alpha_1 \cdot m + f \cdot \frac{m_2}{r_2^2} \cdot \cos\alpha_2 \cdot m = f \cdot H \cdot m, \text{ wenn } H = \frac{m_1}{r_1^2} + \frac{m_2}{r_2}$$

wieder die Feldintensität bedeutet, d. h. die Kraft auf die Masse $1/f$.

Die Richtung der Kraftlinien ergibt sich aus dem Verlauf der Niveauflächen (bezw. Niveau- oder Äquipotentiallinien in einer Ebene), dem geometrischen Ort der Punkte, an welchen die Masse $m = 1/f$ dieselbe potentielle Energie hat[1]). Ist P der Betrag dieser Energie in sehr großer Entfernung, so verliert sie bei Annäherung gegen die Masse m_1 (m_2 nicht vorhanden gedacht) bei der Verschiebung um dr_1 den Betrag $\frac{m_1}{r_1^2} \cdot dr_1$, also bei Annäherung bis auf den Abstand r_1 den Betrag $\int_\infty^r \frac{m_1}{r_1^2} dr_1 = \frac{m_1}{r_1}$.

Demgemäß ist hier die Energie $P - \frac{m_1}{r_1}$. Von der anderen Masse rührt ein weiterer Verlust von $\frac{m_2}{r_2}$ her, so daß der wahre Wert der Energie $P - \left(\frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2}\right)$ beträgt. Setzt man $P = 0$, so ist eine Niveaufläche dadurch bestimmt, daß auf ihr die Summe $\frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2}$, das Potential überall denselben Wert hat.

Fig. 3263.



Zur Ausführung der Konstruktion zieht man erst die nur von m_1, dann die von m_2 herrührenden Niveaulinien, addiert an den Kreuzungspunkten die Potentialbeträge und verbindet dann alle Punkte gleichen Potentials, wie Fig. 2230, S. 726, untere Hälfte zeigt.

Das sich hierbei ergebende System von Niveau- und Kraftlinien ist in Fig. 3263 dargestellt.

In analoger Weise gestaltet sich die Konstruktion bei drei und mehr Massen. Im allgemeinen wird ein Körper entweder eine ellipsenähnliche Bahn um die beiden anziehenden Massen durchlaufen oder eine Art Lemniskate, indem er abwechselnd um den einen, dann um den anderen kreist. Die genaue Durchführung der Rechnung bereitet aber große Schwierigkeiten.

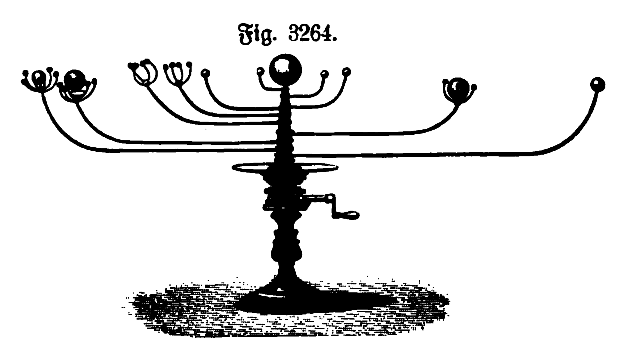
525. **Bahnen im Gravitationsfeld.** Hagenbach (Carls Rep. IV, 117) hat zur Demonstration derselben einen Apparat vorgeschlagen, bei welchem die anziehende Kraft durch einen Magneten ausgeübt wird, was aber voraussetzt, daß man das Attraktionsgesetz eines Elektromagneten vorläufig als richtig annehme.

K. Fuchs (Z. 16, 343, 1903) benutzt eine parabolische Schüssel. Wird eine kleine Kugel aus dem Mittelpunkt c in den Horizontalabstand r gebracht, so wirkt

[1]) Eine elementare Ableitung des Ausdrucks wird im Kapitel Elektrizität gegeben. Im CGS-System wird die Masse 1 g gewählt. Das **Gravitationspotential** ist 1 CGS, wenn zur Entfernung der Masse 1 CGS (1 g) aus dem Gravitationsfelde bis in unendliche Entfernung die Arbeit 1 CGS (1 Erg) erforderlich ist.

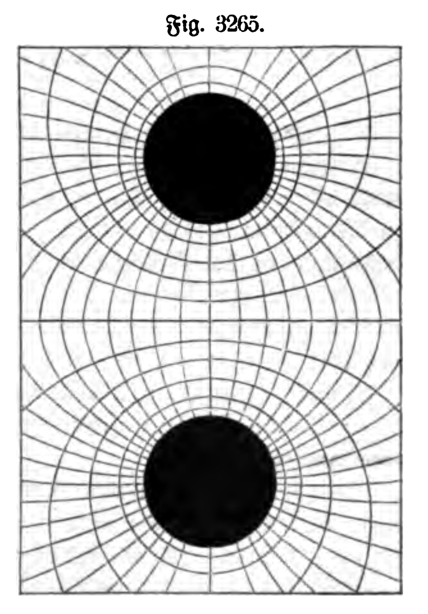
auf sie eine horizontale Zentralkraft, welche dem Abstand *r* proportional ist. Gibt man der Kugel einen Stoß, so rollt sie in der Schüssel in einer Ellipse, deren Mittelpunkt *c* ist. Nimmt man eine hyperbolische Schüssel, so ist die horizontale Zentralkraft umgekehrt proportional dem Quadrate von *r* und wenn die Kugel einen tangentialen Stoß erhält, so rollt sie in der Schüssel in einer Ellipse, deren Brennpunkt der Mittelpunkt der Schüssel ist. Ein flach ausgedrehtes Brett oder ein flacher Hohlspiegel leisten dieselben Dienste.

Fig. 3264.



Nach dem Gesetze der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung wirkt die Gravitationskraft nicht nur auf die Erde, sondern auch auf die Sonne. Dieselben verhalten sich, wie wenn sie durch eine Spiralfeder miteinander verbunden wären. Bringt man nun zwei durch eine solche Feder verbundene verschieden große Massen (wie bei dem Versuche Fig. 3217, S. 1239) auf der Schwungmaschine in Umlauf, so findet nach dem Gesetze der Zentrifugalkraft nur Gleichgewicht statt, wenn sie um ihren gemeinsamen Schwerpunkt rotieren.

Fig. 3265.



Gleiches gilt auch für die Himmelskörper. Wenn also gesagt wird, ein Planet bewege sich in einer Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht, so ist dies nicht genau zutreffend [1]).

526. Kraftzentren und Kraftfäden. Ebenso umkreist der Mond nicht den Schwerpunkt der Erde, sondern beide umkreisen ihren gemeinschaftlichen Schwerpunkt. Da die Masse der Erde 81 mal so groß ist als die des Mondes, ist der Leitstrahl des Mondes 81 mal so lang als der der Erde, die beiden Zentrifugalkräfte sind aber gleich, ebenso auch die Zentripetalkräfte.

Bei der Newtonschen Vorstellung einer von der anziehenden Masse nach allen Richtungen ausstrahlenden Kraft kommt nicht klar zum Ausdruck, daß die vom Mond ausstrahlende Kraft genau ebenso groß sein muß, wie die von der Erde ausstrahlende. Verständlicher wird nach Faradays Auffassung der Vorgang, wenn man sich an Stelle der Kraftzentren Kraftfäden denkt (etwa wie bei Fig. 3265), welche wie gespannte elastische Fäden oder Muskeln die beiden Körper gegeneinander ziehen und gleichzeitig in der Richtung der Querlinien einen Druck auf einander ausüben. (Vgl. S. 668 und § 68, S. 740.)

[1]) Ein Tellurium nach Fig. 3264 liefern Leybolds Nachf. in Köln zu 80 Mk.

Hertz[1]) hat versucht, diese elastischen Spannungen durch verborgene bewegte Massen und bewegliche, aus starren Gliedern bestehende Kuppelungen zwischen denselben zu ersetzen. Ein Beispiel bietet das Bohnenbergersche Maschinchen oder Fessels Apparat. Das Übergewicht verhält sich so, als ob es sich in einem von dem Kreisel ausgehenden Kraftfelde befände, dessen Kraftlinien konzentrische Kreise um den Mittelpunkt des Kreisels sind. Indes ist die Erklärung der Gravitationserscheinungen auch nach diesem Prinzip bisher nicht geglückt.

527. **Wachsen der Drehungsgeschwindigkeit bei Verminderung des Radius.** Nach W. Holtz (1884) zeigt man dieses für die Kant-Laplacesche Theorie der Entstehung der Weltkörper wichtige Theorem durch folgenden kleinen Apparat. Aus zwei leichten, gleichgroßen Holzstäbchen, welche am unteren Ende mit Kugeln beschwert sind, wird eine Art Schere gebildet und diese an ihrem Gelenk an einem Faden aufgehängt. Durch einen das obere Ende des einen und das untere des anderen Stäbchens verbindenden Faden wird die Schere geöffnet gehalten und nun durch Drehen des Aufhängefadens in Rotation versetzt. Brennt man alsdann mit einer Flamme den seitlichen Faden durch, so daß die Kugeln zusammenfallen, so wird die Beschleunigung sofort deutlich sichtbar.

Die Geschwindigkeit, die einem Körper auf der Erdoberfläche erteilt werden müßte, um die Schwerkraft gerade zu kompensieren, ergibt sich, da der Erdradius $= 6\,366\,800$ m und $\frac{mc^2}{r} = mg$, zu $c = \sqrt{g.r} = 7900$ m/sec.

528. **Entstehung der Himmelskörper.** Das Volumen der Sonne ist etwa $1\frac{1}{2}$ Millionen Mal so groß als das der Erde, ihre Dichte aber nur 0,252[2]), während die der Erde $= 5{,}5$ gefunden wurde. Ihr Aggregatzustand ist somit der hohen Temperatur entsprechend als gasförmig zu betrachten. Entsprechend ihrer großen Masse ist die Fallbeschleunigung auf ihrer Oberfläche 272 m/sec², obschon der Radius 112 mal so groß ist als der der Erde. Immerhin würde bei fortschreitender Abkühlung die zunehmende Rotationsgeschwindigkeit Ablösung eines Ringes vom Äquator bewirken müssen. Nach Kant (1755) sind auf diese Weise auch die schon vorhandenen Planeten entstanden. Dafür spricht, daß die Rotationsachse der Sonne nahezu senkrecht steht auf der Ebene der Erdbahn und der der Planetenbahnen[3]).

Die Erde und die Planeten bewegen sich ferner um die Sonne im gleichen Sinne, in welchem dieselbe rotiert, ebenso die Trabanten um die Planeten, der Mond um die Erde. In den Abständen der Planeten von der Sonne zeigt sich eine gewisse Regelmäßigkeit, welche nur für einen Abstand insofern eine Ausnahme erleidet, als in dieser Entfernung statt eines Planeten eine sehr große Menge sehr kleiner Himmelskörper, die Planetoiden, kreisen. Die Erde und die Planeten zeigen sich an ihren Polen abgeplattet. Der Saturn ist von einem Ringe umgeben, welcher in der Ebene seines Äquators liegt.

Verschiedene Schwierigkeiten, denen die Theorie anfänglich begegnete, insbesondere bezüglich der Rotationsrichtung der Planeten, wurden später durch Laplace u. a.

[1]) H. Hertz, Die Prinzipien der Mechanik. Leipzig 1894, Barth. — [2]) Siehe Holzmüller, Das Potential, S. 12. Leipzig 1898. — [3]) Die Sonnenmasse ist etwa 325000 mal so groß als die der Erde.

beseitigt[1]). Auch experimentell läßt sich die Ablösung von Ringen und Tropfen von einem rotierenden Flüssigkeitstropfen nachweisen, sowie die Zerteilung eines Ringes in mehrere Tropfen. Der betreffende Versuch wird später in dem Kapitel Hydrodynamik beschrieben.

529. **Anzugskraft und Arbeit.** Wenn Pferde einen Wagen anziehen, so spannen sich die Stränge, es wird eine Kraft „geweckt" oder „induziert", welche eine elastische Dehnung derselben hervorbringt, der sog. Trägheitswiderstand des Wagens. Diese Kraft tritt erst auf, wenn sich der Wagen in Bewegung setzen soll. Würde man die Trägheit durch eine permanent wirkende wahre Kraft (vgl. S. 665) ersetzen, so könnte sich der Wagen nicht bewegen, es wäre Gleichgewicht zwischen dieser Kraft und der Zugkraft der Pferde vorhanden. Dies ist der Inhalt des Prinzips von d'Alembert, welches ermöglicht, Probleme der Dynamik auf solche der Statik zu reduzieren. Zur Überwindung des Trägheitswiderstandes ist ebenso wie zur Überwindung einer wahren Widerstandskraft Arbeit erforderlich. Das Resultat dieser Arbeit ist die dem Wagen erteilte Bewegungsenergie, welche ebenso viel Kgm oder Erg beträgt als die zum Anziehen des Wagens verbrauchte Arbeit. Durch Überwindung eines Reibungswiderstandes wird die Arbeit (scheinbar) vernichtet; durch Überwindung der Gegenkraft der Induktion wird sie nur in eine andere Energieform umgewandelt und wird vollkommen zurückerstattet beim Anhalten des Wagens, wobei ebenfalls eine Kraft induziert wird, die aber nun die gleiche Richtung hat wie die Bewegung des Wagens, eine Extrabewegung hervorzubringen strebt, die zum Betrieb irgend eines Mechanismus verwendet werden könnte, z. B. zum Heben einer Last, und dabei gerade soviel potentielle Energie erzeugen würde, als Arbeit zum Anziehen des Wagens verbraucht wurde. Die Arbeit zum Anhalten ist also der zum Anziehen gleich, die erstere vergrößert, die andere verkleinert die Bewegungsenergie. Ist Reibung vorhanden, so gilt dasselbe, nur muß die zur Überwindung der Reibung nötige Kraft von der Zugkraft der Pferde in Abrechnung gebracht werden.

530. **Beschleunigung eines Wagens.** Setzt man einen Wagen von der Masse M durch ein an einem Faden ziehendes Gewicht von der Masse m in Bewegung, so ist die erzielte Beschleunigung g'mal der gesamten in Bewegung gesetzten Masse $M + m$ gleich der treibenden Kraft, d. h. gleich der Schwere des Gewichtsstückes, welche $m \cdot g$ beträgt. Somit ist:

$$g'(M + m) = mg$$

oder

$$g' = g \frac{m}{M + m}.$$

Zur Demonstration benutze ich das schon früher erwähnte 4 m lange Geleise. Die an dem Wagen ziehende Schnur ist am Ende über eine Rolle geführt, geht dann senkrecht in die Höhe über eine zweite Rolle an der Decke und ist am Ende mit einer Wagschale belastet, deren Gewicht gerade ausreicht, die Reibungswiderstände zu kompensieren. Zur Erhöhung der Masse wird der Wagen mit Bleistücken belastet.

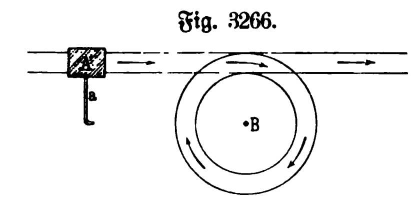
[1]) Nach Seemann (s. Prometheus 11, 753, 772, 1900 u. 12, 177, 1901) besteht eine Hauptschwierigkeit, auf welche die Theorie stößt, darin, daß sich die Sonne langsamer um ihre Achse dreht, als der Merkur um die Sonne, während doch nach Ablösung des Merkur die Rotationsgeschwindigkeit der Sonne zugenommen haben sollte. Über einen Versuch zur Beseitigung der Schwierigkeit sei auf die zitierte Abhandlung verwiesen.

Ist sein Gewicht nebst dem der Wagschale = 29,7 kg, das des treibenden Gewichts = 0,3 kg, so ist $g' = 9{,}81 \cdot \frac{0{,}3}{30} = 0{,}0981\, m/sec^2$. Demgemäß sind die Wege, die der Wagen in 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 Sekunden zurücklegt: 0,049, 0,193, 0,441, 0,781, 1,22, 1,76, 2,4, 3,2, 4,0 m. An diesen Stellen werden Marken angeklebt, auf welche ein am Wagen befestigter Zeiger hinweist, wenn derselbe an der betreffenden Stelle steht. Läßt man den Wagen mit dem Schlage der Sekundenuhr los, so erreicht er mit jedem Schlage die nächste Marke.

Man kann durch eine solche Kombination zweier Massen in ähnlicher Weise wie mit der Fallrinne (§ 63, S. 729) eine mäßig beschleunigte Bewegung herstellen und aus der beobachteten Beschleunigung die Beschleunigung beim freien Fall berechnen. (Vgl. auch Williams, Z. 15, 97, 1902.)

531. **Arbeit von Zentralkräften.** Bewegt sich ein Körper unter dem Einfluß einer Zentripetalkraft nach Fig. 3189 im Kreise, so ist die Arbeit dieser Kraft nach dem Satz über die Arbeit bei gezwungener Bewegung (§ 48, S. 698) gleich Null, da die Richtung der Verschiebung senkrecht steht zur Kraftrichtung. Dasselbe ergibt sich speziell in dem Falle, wenn die Zentripetalkraft die Schwerkraft ist, aus dem Gravitationsgesetz (§ 66, S. 736), da die Niveauflächen der Energie (§ 61, S. 725) Kugelflächen mit der anziehenden Masse als Zentrum sind, somit eine Arbeit nur geleistet werden kann beim Übergang von einer Kugelfläche zur andern. Auch im Falle einer zwei Kugeln auf der Schwungmaschine verbindenden Spiralfeder (§ 18, S. 665 u. § 511, S. 1239), d. h. für sogenannte „innere Kräfte", ergibt sich dasselbe. Die Feder leistet beim Umlaufen der Kugeln keine Arbeit[1]).

Fig. 3266.



Würde ein etwa von einer schiefen Ebene herabkommender Wagen A (Fig. 3266) auf ein horizontales Geleise mit kreisförmiger Schleife gelenkt oder würde er etwa durch einen vorspringenden Haken a, welcher an den Pfeiler B anstößt, aber diesen, auf einer Schraubenlinie ansteigend, nach Durchlaufen der Kreisbahn wieder verläßt, genötigt, die Schleife zu durchlaufen, so wäre die Geschwindigkeit auf dem ganzen Wege dieselbe.

532. **Beschleunigung einer rotierenden Masse.** Zum Nachweis, daß für die Winkelbeschleunigung dasselbe gilt, wie für die Beschleunigung eines in gerader Linie bewegten Körpers, benutze ich ein schweres eisernes Schwungrad, um dessen Welle eine nicht gedrehte (geklöppelte) Schnur gewickelt ist, die über eine an der Decke befestigte Rolle geführt und mit einem Gewichte belastet wird. Letzteres bewegt sich längs eines senkrechten Maßstabes, auf welchem Teilstriche in den Abständen 1, 4, 9... von der Anfangsstellung des Gewichtes aus gerechnet, weithin sichtbar aufgetragen

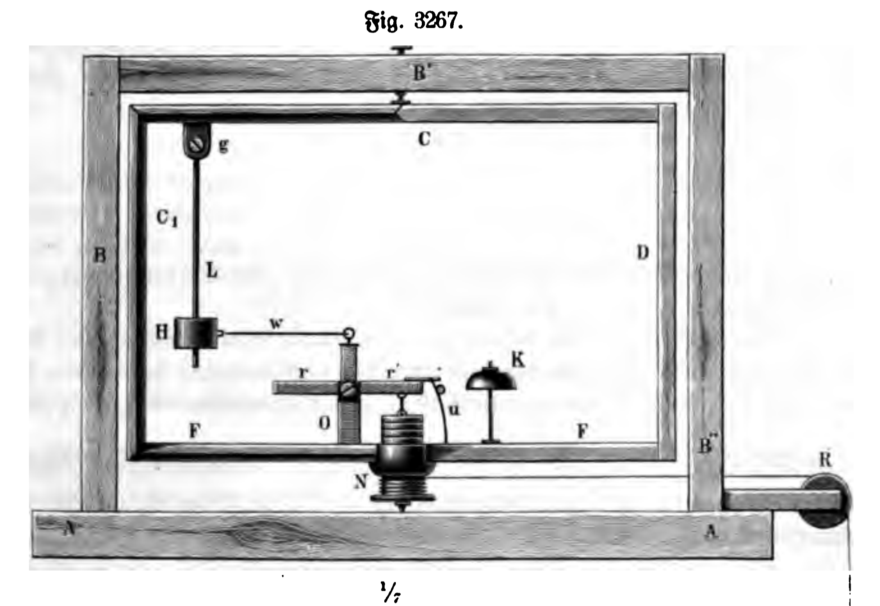
[1]) Bei Konstruktion der Fig. 3189 wurde aber von der Beschleunigung der Masse in der Kraftrichtung, d. h. dem Wege, den der Angriffspunkt in der Kraftrichtung zurücklegt, gesprochen und früher wurde Arbeit definiert als Produkt dieses Weges mit der Kraft (§ 23, S. 668). Man sieht, daß hier eine Unklarheit der Ausdrucksweise vorliegt (vgl. § 23, S. 669), die leicht zu falscher Auffassung führen kann. Es erscheint deshalb zweckmäßig, auf diesen Punkt ausdrücklich hinzuweisen.

sind. Ein Metronom wird so reguliert, daß sich jeweils beim Schlage desselben das Gewicht bei einem Teilstrich befindet.

Zur Messung der Beschleunigung einer rotierenden Masse kann die erzeugte Zentrifugalkraft dienen. Hierzu ist folgender von Schleiermacher erfundene und von J. Müller in Freiburg vereinfachte Apparat zu empfehlen.

Auf einem starken Grundbrette *AA*, Fig. 3267, ist der hölzerne Rahmen *BB'B''* befestigt, in welchem sich der leichtere Rahmen *CDFF* an Stahlspitzen drehen kann; der Angriff der Spitzen kann durch die mit einer Schraube versehene Spitze oben bei *B'* reguliert werden. Der bewegliche Rahmen ist in ein abgedrehtes Holz *N* eingelassen. Bei *g* befindet sich an dem Eisenstäbchen das Gewicht *H* und auf dem Ständer *O* der leichte dreiarmige Hebel *rr'*; das Stäbchen *L* und der

Fig. 3267.

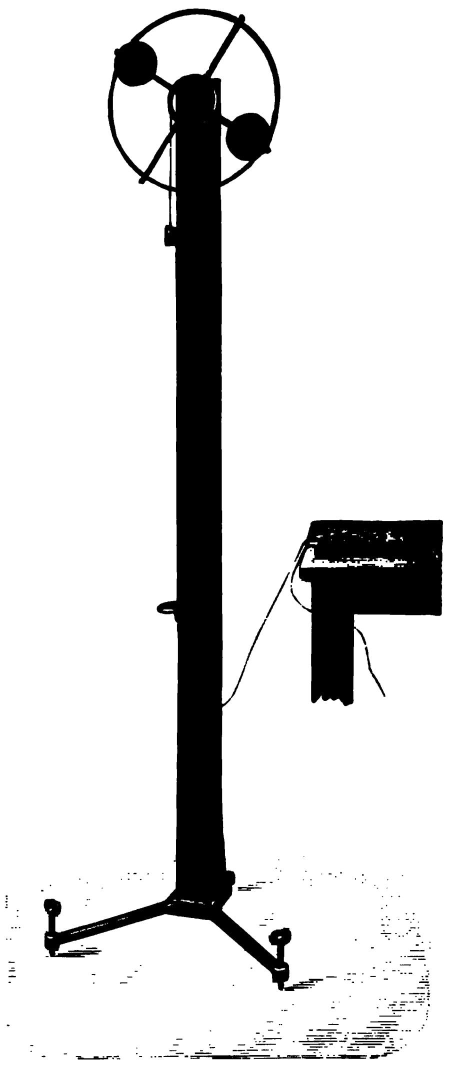


1/7

Hebel *r* bewegen sich an gespitzten stählernen Achsen, welche in Stahlschräubchen laufen. Das Gewicht *H* ist mit dem oberen Arme von *r* durch einen horizontalen Draht *w* verbunden. Die Seite *r'* des Hebels trägt ein messingenes Stück, wie *m*, Fig. 3273, auf welches noch andere mit ihm gleich schwere Stücke, wie Fig. 3274, aufgelegt werden können; *r'* trägt noch an seinem Ende ein etwas nach unten gebogenes Messingstäbchen, unter dessen Vorsprung die Feder *u* mit ihrem Hammer leicht angehalten werden kann; die Feder ist so gerichtet, daß sie, losgelassen, einen Schlag auf die Glocke *K* tut. Auf dem unteren Teile von *N* wird eine daran befestigte Schnur aufgewickelt, welche bei *B''* durch einen Schlitz des äußeren Rahmens und über die Rolle *R* läuft und das Gewicht *P* trägt. Durch dieses Gewicht wird der bewegliche Rahmen in Drehung versetzt und er ist zur Verminderung des Luftwiderstandes auf seiner vorangehenden Seite zugeschärft. Der Apparat wird an das Ende eines Tisches gesetzt, so daß *P* frei sinken kann. Sobald die Zentrifugalkraft von *H* groß genug geworden ist, um das an *r'* hängende Gewicht zu heben, wird die Feder ausgelöst und gibt einen Schlag auf die Glocke. Um den Versuch zu machen, windet man die Schnur auf *N* auf, so daß beide Rahmen ineinander stehen, hält den beweglichen mit der Fingerspitze

Fr. C. G. Müller (1888) benutzt eine mittels eines Achathütchens, ähnlich wie eine Magnetnadel, auf einer Spitze drehbare Weißblechscheibe von etwa 20 cm Durchmesser (812,4 g schwer), auf welche eine Rolle von Buchsbaumholz aufgekittet ist. Ein um letztere gewundener, über eine Rolle geführter und durch ein Gewicht gespannter Faden setzt die Scheibe in gleichförmig beschleunigte Drehung. Die Versuche ergeben eine sehr genaue Übereinstimmung mit der Theorie. (Z. 1, 206, 1888 und 14, 71, 1901.)

Fig. 3271.



Zu gleichem Zwecke dient der von ihm konstruierte Universalapparat Fig. 3272 (Lb, 110[1]).

535. Fallmaschine. Die Verminderung der Fallbeschleunigung bei dem oben beschriebenen Versuch (Beschleunigung einer Schwungscheibe) kann zur Konstruktion einer Fallmaschine[2]) wie Fig. 3271 benutzt werden.

Häufiger findet die Schobersche (Atwoodsche) Fallmaschine Anwendung, bei welcher umgekehrt die Masse des beschleunigten Rades gegen die der geradlinig bewegten Massen gering ist[3]). (Fig. 3273.)

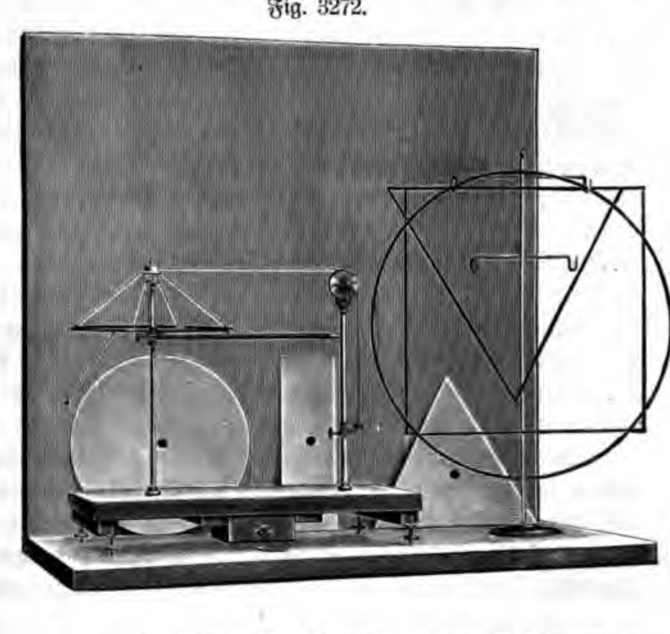
Bei der Anschaffung derselben muß man darauf sehen, daß sie mit einem eigenen Sekundenpendel versehen sei, welches das fallende Gewicht auslöst und die Pendelschwingungen hörbar angibt. (Siehe S. 1312, Fig. 3364.) Allerdings kann man die Auslösung nach irgend einer Sekundenuhr von Hand bewirken und man erwirbt sich bald die hierzu erforderliche Übung; allein diese verliert man auch immer wieder von Jahr zu Jahr, und es ist daher vor dem jedesmaligen Gebrauche stets eine neue Einübung erforderlich. Die Rolle muß in hohem Grade beweglich sein und für diesen Zweck an stählernen Spitzen laufen; um ihre leichte Beweglichkeit zu erhalten, reinigt man ihre Lager und die Spitzen nach dem Ge-

[1]) Bezüglich der Berechnung des Trägheitsmomentes siehe Keferstein, Z. 16, 77, 1903. — [2]) Weinhold, Physikalische Demonstrationen, 3. Aufl. 1899, S. 66. — [3]) Auch die oben S. 1263 beschriebene Beschleunigung eines Wagens auf horizontaler Bahn gehört im Prinzip hierher, wenn die Massen der Rolle und der Wagenräder nicht verschwindend klein sind oder gar groß gegenüber der Masse des Wagens.

brauche sorgfältig von Fett, damit sie nicht verharzen, und ölt dieselben unmittelbar vor dem Versuche frisch ein. Friktionswellen verteuern den Apparat sehr und sind bei sonst guter Arbeit nicht nötig. Ist die Rolle eine gleich dicke Scheibe, so muß ihr halbes Gewicht zu den beiden Gewichten der Maschine addiert werden, wenn man aus dem Verhältnisse der Skalenteile zur Weite des freien Falles das beschleunigende Zulagegewicht berechnen will; für durchbrochene Rollen, welche freilich leichter sind, läßt sich keine solche Regel angeben und man muß das Zulagegewicht durch Versuche bestimmen. Es ist daher am zweckmäßigsten, die Rolle als Scheibe zu nehmen.

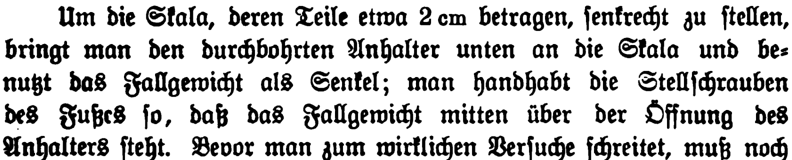
Fig. 3273.

Fig. 3272.



Höfler (Z. 14, 14, 1901) macht das Rädchen zerlegbar, so daß die durch Wägung bestimmte Masse des Radkranzes unmittelbar in die der Träger eingerechnet werden kann. Ferner kann der gewöhnliche leichte Radkranz durch einen solchen von größerer Masse ersetzt werden.

Fig. 3274.



Um die Skala, deren Teile etwa 2 cm betragen, senkrecht zu stellen, bringt man den durchbohrten Anhalter unten an die Skala und benutzt das Fallgewicht als Senkel; man handhabt die Stellschrauben des Fußes so, daß das Fallgewicht mitten über der Öffnung des Anhalters steht. Bevor man zum wirklichen Versuche schreitet, muß noch die Reibung ausgeglichen werden; es geschieht dieses durch Blech- oder Papierscheiben, wie Fig. 3274, von verschiedener Dicke. Sie werden auf das Fallgewicht gelegt, bis dieses auch bei einem leichten Stoße mit dem Finger die ganze

Skalenlänge gleichförmig durchläuft, ohne aber von selbst die Reibung überwinden zu können.

Höfler verbindet die beiden Träger auch unten durch einen Faden, wie es schon Schober, der Erfinder der Fallmaschine (nicht Atwood) getan hat.

Bei den Versuchen stellt man das Übergewicht, welches das Fallen bewirken soll, auf 0, den durchlöcherten Halter auf 4, 9, 16 u. s. w. Dagegen den festen Halter auf eine der Geschwindigkeit des Gewichtes, wenn ihm bei 4, 9, 16 u. dergl. das Übergewicht abgenommen wird, entsprechende Entfernung; also wenn dieses bei 4 (nach zwei Sekunden) geschieht, um 4 oder 2 × 4 oder 3 × 4, bei 9 um 6 oder 2 × 6 u. s. w Teilstriche weiter abwärts, je nachdem man das Gewicht eine, zwei oder drei Sekunden lang gleichförmig fortgehen lassen will. Man muß aber beim Feststellen der Aufhalter berücksichtigen, daß der durchbrochene das Übergewicht abnimmt, also mit seiner oberen Fläche auf die gewünschte Zahl zu stellen ist, daß aber der undurchbrochene Aufhalter um die Länge des Gewichtes weiter abwärts gestellt werden muß. Darum erhalten die Gewichte immer eine solche Länge, welche einen oder zwei ganzen Skalenteilen gleich ist. Wenn man die Versuche mit dem Teilstriche 1 anfängt, also mit einer Sekunde Fallzeit, so treffen sie gewöhnlich nicht gut zu, da alle die störenden Umstände hier noch viel zu viel Einfluß haben. Am meisten ist dieses der Fall bei jenen Maschinen, an welchen das Fallgewicht durch eine umkippende Platte unterstützt wird, ehe es in Bewegung kommt, weniger bei jenen, wo der Faden angedrückt wird, oder wo die Rolle einen vorstehenden Stift hat.

Sind die Aufhalter richtig festgestellt und ist auch das Übergewicht auf 0 gerichtet, so hat man noch, bevor man das Pendel in Bewegung setzt, dafür zu sorgen, daß die Gewichte vollkommen ruhig hängen; ohne dieses werden die Versuche nicht gut zutreffen. Wäre beispielsweise die Masse der beiden Gewichte nebst Trägern, Radkranz und Schnur = 981 Gramm, das Übergewicht 10 Gramm, so wäre $g' = 9{,}81 \cdot \frac{10}{981} = 0{,}1$, somit die Wege nach 1, 2, 3 . . . Sekunden = 0,05, 0,20, 0,45 m, die Endgeschwindigkeiten 0,1, 0,2, 0,3 . . . m/sec, die Wege 3 Sekunden nach Abnahme des Übergewichts: 0,3, 0,6, 0,9 m u. s. w.

Sehr zweckmäßig ist die Einrichtung, wo das obere Ende der Säule so breit ist, daß man eine Glasglocke über die Rolle decken, oder wo man den ganzen Aufsatz abnehmen und in einem besonderen Kästchen vor Staub bewahren kann.

Köpping (1882) ersetzt den zuweilen recht baufälligen hölzernen Dreifuß durch einen solchen aus Gußeisen, mit welchem die Säule sehr fest durch Schrauben verbunden ist. Die Pendelschwingungen werden durch an kurzen Schnüren hängende Kugeln, die an ein Glöckchen schlagen, markiert und der Moment des Aufstoßens des Körpers durch Anschlagen eines tiefer gestimmten Glöckchens [1]).

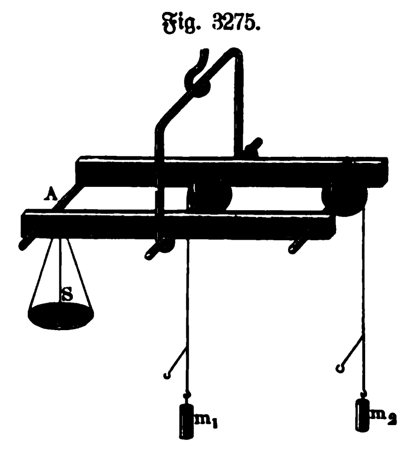
536. Poggendorffs Fallmaschine (Wage). Dieselbe eignet sich besonders gut um nachzuweisen, daß zur Beschleunigung eines Körpers eine Kraft erforderlich ist, die sich bestimmt durch das Produkt der in Bewegung gesetzten Masse mit der hervorgebrachten Beschleunigung. (Fig. 3275.)

---

[1]) Über eine selbstschreibende Atwoodsche Fallmaschine s. Schreber, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 17, 204, 1897.

An einem Ende eines Wagebalkens und in der Mitte befindet sich je eine Rolle. Über dieselben läuft ein Faden, der an beiden Enden durch gleiche Gewichte gespannt ist. Legt man nun auf das in der Mitte hängende Gewicht ein Übergewicht, so sinkt das Ende des Wagebalkens, welches die Rolle trägt und wird nur durch Anhängen eines Gewichtes am anderen Ende wieder zurückgebracht, welches sich nach dem eben erwähnten Gesetze bestimmt, unter Berücksichtigung, daß die ganze in Bewegung gesetzte Masse die Summe aller drei Gewichtsstücke ist und das Produkt derselben mit der Beschleunigung gleich dem Übergewicht sein muß. Das Produkt der hiernach bedingten Beschleunigung mit der Masse des nach aufwärts bewegten Gewichtes gibt den Zug in der Schnur, somit nach dem Gesetz nach Gleichheit und Gegenwirkung auch den Zug am Wagebalken, also die Größe des am anderen Wagebalkenende anzubringenden Zusatzgewichtes. Ist die Masse des Übergewichtes sehr klein gegenüber den beiden gleich großen Massen, so ist das Zusatzgewicht nahezu die Hälfte des Übergewichtes [1]).

Fig. 3275.



537. **Energie eines Schwungrades.** Töpler bedient sich zur Demonstration des Arbeitsverbrauches zur Inbetriebsetzung eines Schwungrades einer Vorrichtung, welche einigermaßen der Atwoodschen Fallmaschine gleicht, indes sich dadurch von derselben unterscheidet, daß der Faden nur am einen Ende mit einem Gewichte beschwert ist, am anderen um eine Trommel gewunden ist, mit welcher durch Reibungskuppelung in beliebiger Zeit nach Beginn des Falles ein Schwungrad in Verbindung gesetzt werden kann, wobei nun die Bewegungsenergie des fallenden Gewichtes teilweise in Umdrehungsenergie des Schwungrades verwandelt wird. Statt des Schwungrades kann auch eine zweite Trommel angekuppelt werden, durch deren Umdrehung ein größeres Gewicht als das fallende aufgewunden wird — in gewissem Sinne ein Analogon des hydraulischen Widders [2]).

Ein Spielzeug, welches hierher gehört, ist folgendes. Eine Achse mit Schwungrad wird ähnlich wie ein Kreisel durch Abziehen eines Fadens in rasche Rotation versetzt und auf einen kleinen Wagen derart aufgelegt, daß sich die Bewegung den mit Kautschuk überzogenen Hinterrädern des Wagens mitteilt. Der Wagen bewegt sich dann natürlich so lange, als die Bewegung des Kreisels anhält.

Einen Wagen, sowie ein Schiff zum Betrieb mit einem aufgesetzten Kreisel als Spielzeug liefern Wachenfeld u. Schwarzschild, Kassel, Grüner Weg 9.

Plateau (1879) macht darauf aufmerksam, daß man leicht einen Kreisel unendlich lange Zeit laufen lassen kann, wenn man dafür sorgt, daß sich sowohl die Unterlage wie die umgebende Luft mit gleicher Geschwindigkeit bewegt. Er setzt zu

---

[1]) Der Apparat wird nach Angaben von K. L. Bauer (siehe Wied. Ann. 17, 1037, 1882) von E. Sickler in Karlsruhe hergestellt. Über eine Abänderung, bei welcher die Schwerkraft durch die Elastizität einer Feder ersetzt wird, siehe Chabot, Physik. Zeitschr. 4, 565, 1903. — [2]) Der Apparat ist zu beziehen von O. Leuner in Dresden, Technische Hochschule, zu etwa 65 Mk.

diesem Zwecke eine Kreisscheibe durch einen kleinen Wassermotor in kontinuierliche Rotation, stellt in den Mittelpunkt den gleichsinnig rotierenden Kreisel und deckt darüber eine Glasglocke, so daß auch die umgebende Luft in gleichem Sinne mit bewegt wird.

Enthält ein Schwungrad bewegliche Teile, welche mit der Hauptmasse durch Federn verbunden sind, so kann die Federspannung dazu dienen, während der Geschwindigkeitszunahme den Energieüberschuß aufzuspeichern und bei der Abnahme wieder abzugeben (siehe Lecornu, Beibl. **24**, 1243, 1900).

538. **Wirkung und Gegenwirkung.** (Prinzip der Erhaltung der Flächen.) Wird durch eine Kraft ein Schwungrad in Umdrehung versetzt, so wird durch die Gegenwirkung der Kraft gleichzeitig dem Gestell (event. der Erde) die entgegengesetzte Drehung erteilt.

v. Lang demonstriert die Reaktion bei Rotation[1]) mittels des Elektromotors von Ritchie. Der Motor ist in einem vertikalen Rahmen, der sich um seine Mittellinie drehen kann, aufgestellt. Sobald die Maschine in Gang kommt, beginnt sich der Rahmen in entgegengesetztem Sinne zu drehen.

Da die elektrischen Erscheinungen erst später behandelt werden, wäre es zweckmäßiger, statt des Elektromotors ein kleines Uhrwerk mit Feder zu wählen.

Einen von Mach ersonnenen Apparat[2]) zeigt Fig. 3276 (E, 35).

Fig. 3276.

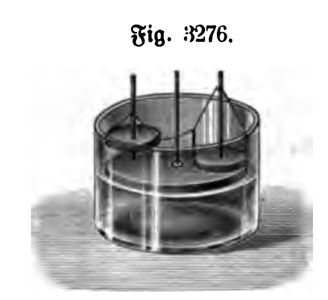
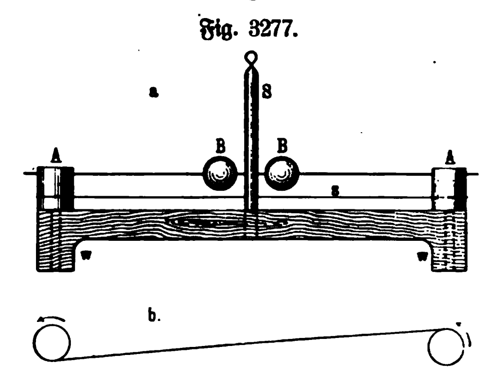


Fig. 3277.



Wird eine der beiden kleinen schweren Kreisscheiben gedreht, so daß sich die beiden Schnüre um das durch die Zentrale gehende Stäbchen wickeln, und nun losgelassen, so kommt sie in Rotation, gleichzeitig aber beginnt auch die auf Wasser schwimmende Scheibe, auf welcher das Stäbchen befestigt ist im entgegengesetzten Sinne zu rotieren. Beim Auftreffen der kleinen Scheibe auf die große vernichten sich die beiden Drehungen. Um Erschütterungen zu vermeiden, kann man, wie links in der Figur dargestellt ist, die aufgewundene Scheibe mit dem Mittelstab durch einen Faden verbinden und diesen, nachdem alles zur Ruhe gekommen, durchbrennen.

Durch gleichzeitige Benutzung von zwei Scheiben kann auch die Zusammensetzung von Drehungen gezeigt werden[3]).

Fuchs (Z. 15, 218, 1902) hat den Apparat Fig. 3277 ersonnen. Die Achsen AA sind in dem an S drehbar aufgehängten Stab ww drehbar. Auf sie ist eine durch eine Öse von S hindurchgehende Kautschukschnur s aufgewickelt, wie b

[1]) Siehe Zeitschr. f. Instrumentenkunde 3, 159, 1883. — [2]) Zu beziehen von Ernecke, Berlin. (Beschreibung in Carls Repertorium 4, 360, 1868.) — [3]) Über Apparate zur Demonstration der Zusammensetzung von Drehungen siehe K. Fuchs, Z. 5, 239, 1892.

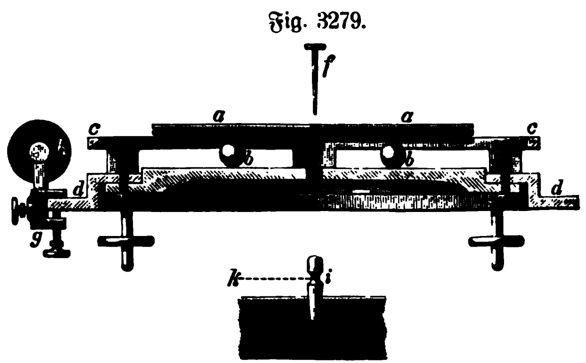
zeigt, und durch Drehen von AA mittels der quer durchgesteckten, die Bleikugeln BB tragenden Stricknadeln gespannt. Letztere werden durch einen Faden an S gebunden. Brennt man diesen durch, so drehen sie sich einmal herum, bis sie wieder an S schlagen. ww drehte sich gleichzeitig entgegengesetzt, kommt aber wieder zum Stillstand, wenn die Stricknadeln anschlagen. Der Apparat ist dann wieder in Ruhe, aber ww um einen großen Winkel gegen die Anfangsstellung verdreht.

Fig. 3278.



539. Zusammensetzung von Drehungen. Töpler hat einen Universalapparat für Demonstrationen zur Statik und Dynamik starrer Körper konstruiert (Z. 1, 137, 1888), Fig. 3278, welcher gestattet, folgende Versuche auszuführen: 1. Das ebene Kräftepolygon. 2. Gleichgewicht paralleler Kräfte. 3. Mittelpunkt paralleler Kräfte. 4. Gleichgewicht von Kräftepaaren in einer Ebene. 5. Parallelogramm der Kräftepaare. 6. Gleichgewicht von Kräftepaaren im Raume. 7. Gleichgewicht beliebiger Kräfte im Raume. 8. Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten. 9. Verallgemeinertes Hebelgesetz. 10. Schiefe Ebene. 11. Momentanzentrum der Bewegung. 12. Progressivbewegung beim Angriff einer Kraft im Schwerpunkt. 13. Ein Kräftepaar veranlaßt am frei beweglichen Körper nur Drehung um den Schwerpunkt. 14. Gleichförmig beschleunigte Drehbewegung. 15. Schwingende Drehbewegung u. s. w.

Fig. 3279.



Das Wesentlichste der inneren Einrichtung des Apparates ist aus dem Durchschnitt Fig. 3279 zu ersehen[1]). aa ist eine schwere kreisförmige Scheibe aus Gußeisen, unten möglichst eben abgeschliffen, welche unter Vermittelung der Hartbronze-

[1]) Er ist von dem mechanischen Institute von O. Leuner in der Technischen Hochschule zu Dresden zum Preise von etwa 200 Mk. zu beziehen.

kugeln $b\,b$ auf der gleichfalls eben geschliffenen genau horizontal gestellten Unterlagsplatte $d\,e\,d$ ruht. Auf der Oberfläche der Scheibe $a\,a$ können vermittelst konischer Stöpsel (i) Fäden ($k\,i$) befestigt werden, die über Leitrollen (k) geführt und durch Gewichte gespannt die Kräfte darstellen. Durch den Stift f kann eventuell der Scheibe ein festes Drehungszentrum gegeben werden. Von den verschiedenen angegebenen Versuchen seien hier beispielsweise die drei letzten etwas näher ausgeführt.

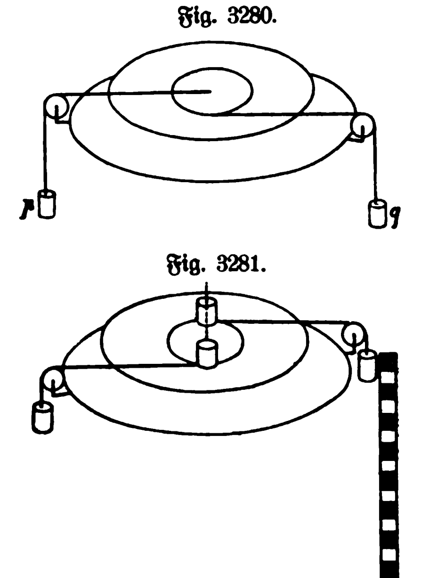

Fig. 3280.

Fig. 3281.

Läßt man, wie bei Fig. 3280, eine Kraft p im Zentrum der frei beweglichen Scheibe angreifen, eine andere ebenso große Kraft am Rande einer aufgesetzten Holzrolle, so gerät die Scheibe um ihr Zentrum in Drehung, indem die Kraft p keine Beschleunigung des Angriffspunktes erzeugt, vielmehr dem Gegendrucke des Zapfenlagers entspricht, wenn die Scheibe wirklich um einen Zapfen drehbar wäre.

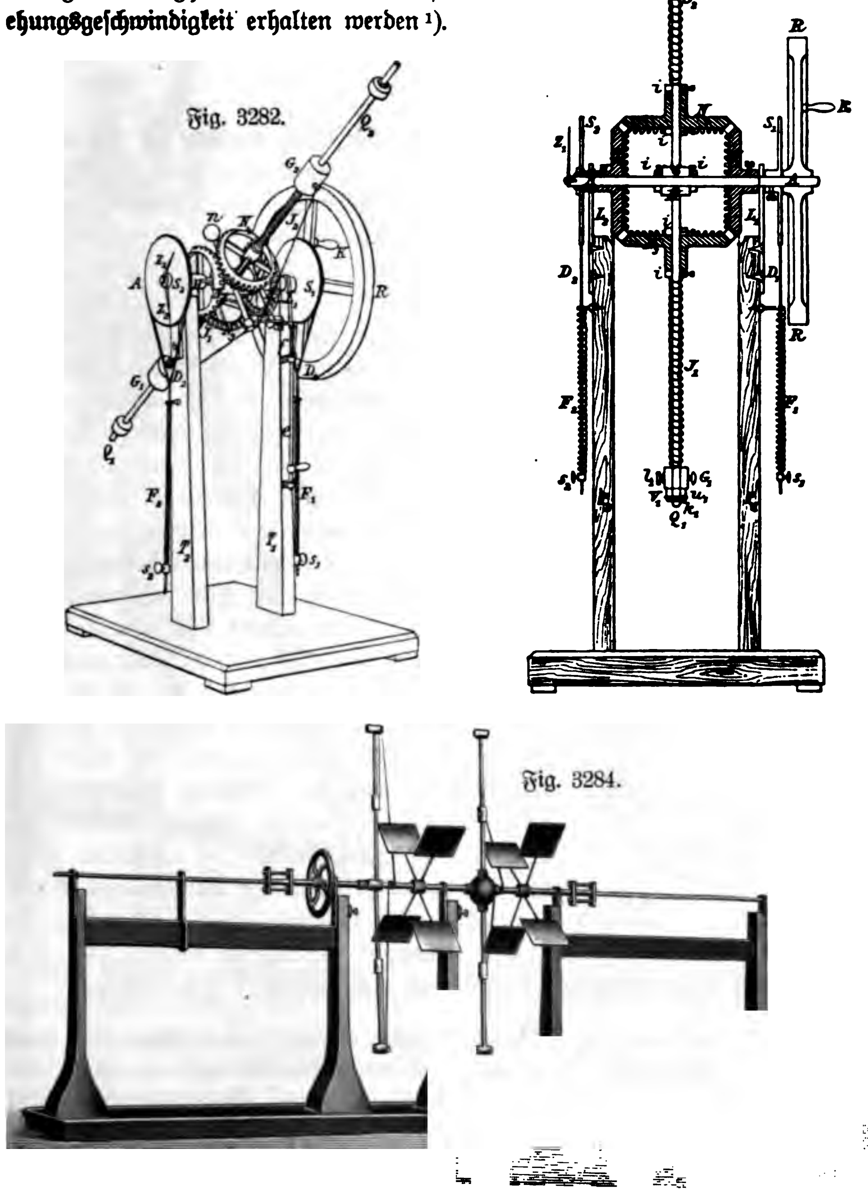
Das Schema Fig. 3281 zeigt die Demonstration der gleichförmig beschleunigten Drehbewegung. Die von Anfang der Bewegung an durchlaufenen Drehungswinkel verhalten sich wie die Quadrate der Bewegungszeiten, oder die Fallräume verhalten sich wie die Quadrate der Fallzeiten. Verdoppelt man die treibenden Gewichte, so werden auch die Fallräume doppelt so groß. Die zum Durchlaufen derselben Fallräume erforderlichen Zeiten verhalten sich umgekehrt wie die Wurzeln der Drehmomente. Wenn also z. B. ursprünglich das Durchlaufen der Strecken zwischen den Teilstrichen 0, 1, 4, 9 ... der Skala immer je zwei Metronomschläge erforderte, so ist nach Vervierfachung des Drehmomentes nur je ein Metronomschlag erforderlich.

Wie bereits oben bemerkt, kann man bei dem Apparat Fig. 3236 durch Auf- und Abbewegen der Punkte $a\,a$, d. h. durch Oszillationen um eine zu $a\,a$ senkrechte Achse, den Kreisel in andauernde Rotation um die zu seiner Rotationsachse senkrechte Achse $a\,a$ bringen. Während einer kurzen Zeit bewegt sich in diesem Falle der Kreisel gleichzeitig um drei zueinander senkrechte Achsen. Kontinuierliche Drehung um die zu $a\,a$ senkrechte Achse ist aber nicht möglich, da alsbald nach Beginn der Drehung der Kreisel in die stabile Lage umschlägt und in dieser verharrt.

540. **Mechanische Induktion.** Das Trägheitsmoment spielt bei mechanischen Vorgängen dieselbe Rolle wie der Induktionskoeffizient oder der Koeffizient der Selbstinduktion bei elektrischen. Zur Demonstration dieser Erscheinungen haben Boltzmann, Maxwell und Ebert[1]) Dicyklemodelle konstruiert, welche im wesentlichen aus zwei Zahnrädern bestehen, die durch ein sogenanntes Satelliten- oder Planetenrad miteinander gekoppelt sind (Fig. 3282 u. 3283). Das Trägheitsmoment des letzteren läßt sich durch verschiebbare Gewichte ändern. Setzt man das eine Rad plötzlich in Umdrehung, so bewegt sich wegen des Trägheitswiderstandes

[1]) Siehe Ebert, Magnetische Kraftfelder 2, 320, Leipzig 1896, Barth.

Satellitenrades das andere entgegengesetzt (Analogon des entgegengesetzt ge-
teten Induktionsstromes beim Schließen eines Stromes). Verlangsamt man die
ehung des ersten Rades, so nimmt das zweite
olge der Trägheit des Satellitenrades gleich-
nige Drehung an (Analogon des gleichgerichteten
duktionsstromes beim Öffnen eines Stromes).
enso können Induktionswirkungen durch Ver-
derung des Trägheitsmomentes bei konstanter
ehungsgeschwindigkeit erhalten werden [1]).


Fig. 3282. Fig. 3283. Fig. 3284.

[1]) Siehe auch L. Boltzmann, Vorlesungen über Maxwells Theorie, Leipzig 1891, Ebert, Wied. Ann. 49, 642, 1893 und Chabot, Phys. Zeitschr. 4, 565, 1903.

Garbasso (Z. 15, 332, 1902) benutzt einen Apparat mit Differentialgetriebe nach Fig. 3284 als Modell von zwei Stromkreisen mit endlichen Kapazitäten zur Erläuterung der Hertzschen Resonanzerscheinungen.

Die nähere Untersuchung komplizierter dynamischer Erscheinungen ist Sache der theoretischen Mechanik [1]). Dieselbe geht aus von allgemeinen Sätzen, sog. Prinzipien, unter welchen das d'Alembertsche Prinzip das hervorragendste ist, sowie die Gleichungen von Lagrange, welche daraus hervorgehen. Im Grunde sind alle diese Sätze: Prinzip der virtuellen Verschiebungen, Prinzip von Hamilton, Prinzip des kleinsten Kraftaufwandes, der kleinsten Wirkung, des kleinsten Zwanges, der schnellsten Ankunft, der geradesten Bahn u. s. w., nur Modifikationen derselben Tatsache.

341. Einfluß der Reibung. Noch komplizierter werden die Erscheinungen, wenn außer dem Trägheitswiderstande noch Reibungswiderstände in Betracht zu ziehen sind, welche bei den eben beschriebenen Apparaten als Analogon des elektrischen Widerstandes eingeführt werden können. (Eindringen eines Projektils in Lehm, Feuerrettungsseil, Schwungradbremse.) Der einfachste Fall eines Schwungrades mit Achsenreibung läßt sich ebenso behandeln, wie die gleitende Bewegung, d. h. die Beschleunigung ist dieselbe, als ob statt der treibenden Kraft die Differenz derselben und des Reibungswiderstandes wirksam wäre. Ist die Reibung der treibenden Kraft gleich, so tritt schließlich ebenso wie beim Gleiten auf ebener Bahn gleichförmige Geschwindigkeit ein, da eine einmal erteilte Geschwindigkeit nach dem Trägheitsgesetz erhalten bleiben muß und die Reibung fester Körper unabhängig ist von der Geschwindigkeit. In vollkommener Strenge ist letzteres allerdings nicht zutreffend, die Reibung wächst etwas mit der Geschwindigkeit und wenn deshalb auch anfänglich die Bewegung des Schwungrades eine beschleunigte war infolge eines Kraftüberschusses über die Reibung, so vergrößert sich doch mit zunehmender Geschwindigkeit letztere so, daß sie der Kraft gleich wird, und diese Geschwindigkeit bleibt dann gleichmäßig erhalten, da ja Vergrößerung derselben sofort infolge der Vergrößerung der Reibung Verzögerung des Rades herbeiführen würde. Ebenso nimmt z. B. ein Eisenbahnzug unter Wirkung der konstanten Zugkraft der Lokomotive gleichförmige Geschwindigkeit an.

Fig. 3285.



Minimale Reibung und demgemäß größte Geschwindigkeit bei gegebener Kraft wird erzielt durch Umwandlung der gleitenden Reibung in rollende (vgl. § 107, S. 775) durch Anwendung von Rollen- und Kugellagern [2]) (Fig. 3285).

---

[1]) Siehe Karl Heun, Formeln und Lehrsätze der allgemeinen Mechanik in systematischer u. geschichtlicher Entwickelung, Leipzig 1902, Göschensche Verlagshandlung; H. Lorenz, Technische Mechanik, München 1902, Oldenbourg; A. Föppl, Vorlesungen über technische Mechanik, Leipzig 1900; A. Wernicke, Lehrbuch der Mechanik, Braunschweig 1901, Friedr. Vieweg u. Sohn; L. Königsberger, Die Prinzipien der Mechanik, Leipzig 1901, Teubner; E. Mach, Die Mechanik in ihrer Entwickelung, Leipzig 1901, Brockhaus; J. Weißstein, Die rationelle Mechanik, Wien 1899, Braumüller; L. Boltzmann, Vorlesungen über die Prinzipien der Mechanik, Leipzig 1897, Barth u. s. w. — [2]) Zu beziehen von der Kugelfabrik Fischer, A.-G. Schweinfurt a. M.

Die Arbeit, welche die treibende Kraft bei gleichförmiger Geschwindigkeit leistet, die Reibungs- oder Leerlaufsarbeit, ist scheinbar verlorene Energie. Soll die Maschine nutzbare Arbeit leisten, z. B. ein Gewicht heben, so muß die treibende Kraft der zu leistenden Arbeit entsprechend vergrößert werden. Das Verhältnis dieser nutzbaren Arbeit zur Gesamtarbeit, d. h. der Summe von Leerlaufs- und Nutzarbeit, heißt der Wirkungsgrad der Maschine, die pro Sekunde geleistete Nutzarbeit deren effektive Leistung oder Effekt.



Fig. 3286. Fig. 3287.

542. Gewicht- und Federmotoren. Da die gewöhnlichen Uhrwerke allbekannte Beispiele solcher Motoren sind, so wird man sich bezüglich derselben sehr kurz fassen können. In umgekehrter Weise gedreht, können sie dazu dienen, eine Last (das Gewicht) mit geringer Kraft emporzuheben oder die Feder wieder aufzuziehen.

Größere Gewichtmotoren (Fig. 3286) findet man bei Turmuhren. Federmotoren werden in neuerer Zeit mehrfach zum Betriebe von Nähmaschinen gebraucht [1]). Es konnten solche früher bezogen werden z. B. von Heilmann, Ducommun u. Steinlen in Mülhausen i. E. (Fig. 3287). Eine neuere Form liefern Schreiber,

[1]) Eisenbahnen mit Uhrwerk auf Schienen laufend als Spielzeug liefern Wachenfeld u. Schwarzschild, Kassel, Grüner Weg 9.

Salomon u. Co. in Wien. Ich demonstriere damit die Bestimmung von Arbeit und Effekt durch Gewichtheben.

Je größer die Belastung der Maschine wird, um so mehr wird ihre Geschwindigkeit, d. h. die Tourenzahl, vermindert. Soll dieselbe bei beliebiger Belastung konstant bleiben, so muß sich die treibende Kraft selbsttätig der Belastung anpassen, was z. B. durch Anwendung eines Zentrifugalregulators erzielt werden kann. Bei einem Gewicht- oder Federmotor könnte derselbe z. B. die Zahl der treibenden Gewichte bezw. Federn durch Ein- und Ausschalten einzelner ändern, bei einem Wasser-, Druckluft-, Heißluft-, Dampf- oder Gasmotor mittels eines Drosselventils den Zufluß des Wassers, der Druckluft, des Dampfes u. s. w. drosseln oder freigeben, weniger zweckmäßig eine Bremse betätigen.

543. **Effekt.** Unter dem Effekt irgend eines Motors versteht man die Arbeit pro Sekunde. Die Einheit des Effektes ist a) technisch: die Leistung von 1 kgm pro Sekunde; b) absolut: die Leistung von 1 Erg pro Sekunde.

Der Effekt von 75 kgm wird in der Maschinentechnik Pferdekraft genannt. Wenn man also sagt, eine Dampfmaschine habe eine Stärke von 20 Pferdekräften, so heißt das, sie vermag sekundlich eine Arbeit von 20.75 = 1500 kgm zu leisten[1]).

Nach Fr. v. Rziha ist die durchschnittliche Leistung eines Arbeiters $^1/_{12}$ Pferdekraft. Genauer beträgt sie bei zwölfstündiger Lohnschicht bei fünf- bis achtstündiger Tätigkeit 7,0 bis 4,4 kgm pro Sekunde, bei achtstündiger Lohnschicht und dreidreiviertel bis sechsstündiger wirklicher Arbeitszeit 9,4 bis 6,0 kgm pro Sekunde.

Bucerius[2]) gibt folgende Zahlen: Mann ohne Maschine 8 Stunden arbeitend kgm pro Sek. 12 (= $^1/_6$ PS), an der Kurbel 8 (= $^1/_{10}$ PS), an der Feuerspritze 2 Min. Arbeitszeit 25,2 (= $^1/_3$ PS), Frau an der Nähmaschine 3,75 (= $^1/_{20}$ PS).

Die gesamte Tagesleistung ist beim Ziehen 110000 kgm, beim Emportragen von Lasten 122168 kgm, beim Treppensteigen 140000 kgm und beim Arbeiten am Hebel 146954 kgm. Die durchschnittliche Tagesleistung beträgt 127415 kgm.

Für einen kurzen Moment kann ein Arbeiter zur Abwendung drohender Gefahr, durch den Selbsterhaltungstrieb veranlaßt, einen Effekt bis zu 100 kgm pro Sekunde = 1,25 Pferdekraft entfalten.

Der Kraftbedarf ist z. B. für eine Sägemühle 3 bis 5 PS, für einen kleinen Schleifstein 0,5 PS, Drehbank 0,34 PS u. s. w.

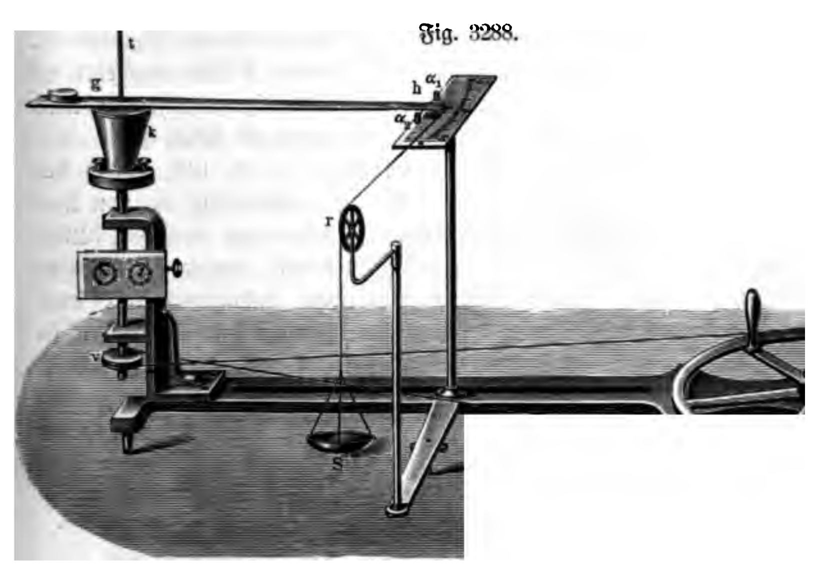
Der Preis beträgt etwa: Mann 2,50, Wassermotor 1,28, Lokomobile 0,13, Gasmotor 0,28, Sauggasmotor 0,07, Benzinmotor 0,31, Dieselmotor 0,08, Elektromotor 0,27 Mk. pro PS-Stunde.

Die Elektrotechniker benutzen als Arbeitseinheit das Joule = 1/g Kilogrammmeter = 10^7 Erg, als Effekteinheit den Effekt von 1 Joule pro Sekunde = 1 Watt. Dieses ist also = 1/g Kilogrammeter pro Sekunde oder 10^7 Erg pro Sekunde. Ein Effekt von 1000 Watt heißt 1 Kilowatt.

Das oben erwähnte Uhrwerk hob 10 Gramm in 7 Sek. auf 1,7 m, somit ist die Leistung $\frac{0,01 \,.\, 1,7}{7 \,.\, 75} = 0,0000322$ PS. Der Federmotor vermochte 400 Gramm in 24 Sek. 1,5 m hoch zu heben. Seine Leistung ist also $\frac{0,4 \,.\, 1,5}{24 \,.\, 75} = 0,00033$ PS.

[1]) Beispielsweise ist eine Karlsruher Pferdekraft = 75.9,81.10^7 = 7,36.10^9 CGS = 7360 Sekundenmegaerg. — [2]) Bucerius, Bad. Gewerbezeitung 37, 451, 1904.

Fig. 3288.



544. Effektmessung. Den Gebrauch der Bandbremse (S. 766, Fig. 2284) und des Pronyschen Zaums (S. 766, Fig. 2280) demonstriere ich an einem durch die Transmission (8 PS) betriebenen Vorgelege. Bei der ersteren gibt Übergewicht × Umfang der Welle × Tourenzahl pro Sekunde direkt den gesuchten Effekt. Zieht man beim Pronyschen Zaum die Schrauben so an, daß der Fortsatz die Gewichte eben heben kann, so ist das Moment derselben gleich dem Moment der Kraft an dem Umfange der Welle nach dem Hebelgesetz. Diese Kraft (in Kilogrammen) vom Umfange der Welle × dem Umfange (in Metern) gibt die Arbeit für eine Umdrehung, und diese × der Umdrehungszahl die Arbeit pro Sekunde, d. h. den Effekt (in Kilogrammetern). Dividiert man noch durch 75, so hat man den Effekt in Pferdekräften. Eine zu gleichen Zwecken dienende einfache Vorrichtung für Demonstrationszwecke nach Puluj ist in Fig. 3288 dargestellt.

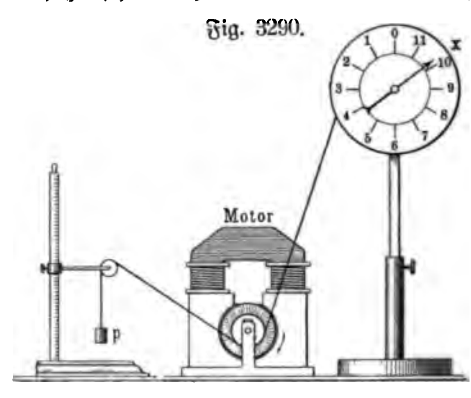
Fig. 3289.



Eine verbesserte Bremse, bestehend aus einem um die Riemenscheibe gelegten Eisenbande, welches sich bei größer werdender Reibung von selbst entspannt, also

bei mangelhafter Schmierung u. s. w. nicht mitgerissen werden kann (Fig. 3289), ist von Brauer konstruiert worden[1]). Bei Messung größerer Effekte empfiehlt es sich, die Riemenscheibe durch innen eingeleitetes Wasser beständig zu kühlen, ebenso auch zwischen Scheibe und Bremsband beständig Öl einlaufen zu lassen[2]).

Fig. 3290.



Kleiber (Z. 17, 143, 1904) benutzt für die Bandbremse die von ihm konstruierte Federwage nach Fig. 3290.

Beispielsweise ergab sich beim Bremsen eines Gasmotors mit dem Pronyschen Zaum bei 40 Touren in 10 Sekunden ein Gewicht von 2,5 kg an einem Hebelarm von 1,68 m bei 0,1 m Riemenscheibenradius. Der Effekt ist also:

$$\frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 4 \cdot 2{,}5 \cdot 1{,}68}{75} = 1{,}4 \text{ PS.}$$

545. **Übertragungsdynamometer.** Die wirksame Kraft des Riemens, mit welcher derselbe drehend wirkt, ist die Differenz der Spannungen des auf- und ablaufenden Teiles. Die Gesamtspannung des Riemens muß um so größer sein, je geringer die Reibung an den Riemenscheiben. Eine gewisse Leistung kann sowohl durch langsam laufenden Riemen mit großer Spannungsdifferenz, wie auch durch rasch laufenden mit geringer Spannungsdifferenz übertragen werden. Durch Messung der Riemengeschwindigkeit und Spannungsdifferenz ergibt sich der übertragene Effekt.

Ist v die Geschwindigkeit des Riemens, T_1 die Spannung der auflaufenden Riemenhälfte, T_2 die der ablaufenden, so ist die pro Sekunde übertragene Arbeit, da die Kraft $= T_1 - T_2$ und der Weg pro Sekunde $= v$:

$$v \cdot (T_1 - T_2) \text{ . Kilogrammeter.}$$

Dabei ist die Peripheriegeschwindigkeit der Riemenscheibe $= \frac{2\pi r . n}{60}$ (wenn r der Radius und n die Tourenzahl) ebenso groß wie die Geschwindigkeit v des Riemens, man hat also:

$$v = \frac{2\pi r n}{60}.$$

Dieselbe Arbeit pro Sekunde kann man hiernach in sehr verschiedener Weise übertragen, entweder mit geringer Kraft ($T_1 - T_2$) und großer Tourenzahl oder mit großer Kraft und geringer Tourenzahl. Ähnliches gilt für Friktions- und Zahnräder.

Große Riemengeschwindigkeit ist vorzuziehen, weil wegen der geringeren Spannung auch die Reibung geringer ist.

Auf der Messung der Differenz der Riemenspannungen beruht die Messung des Effekts durch das Dynamometer von v. Hefner-Alteneck[3]).

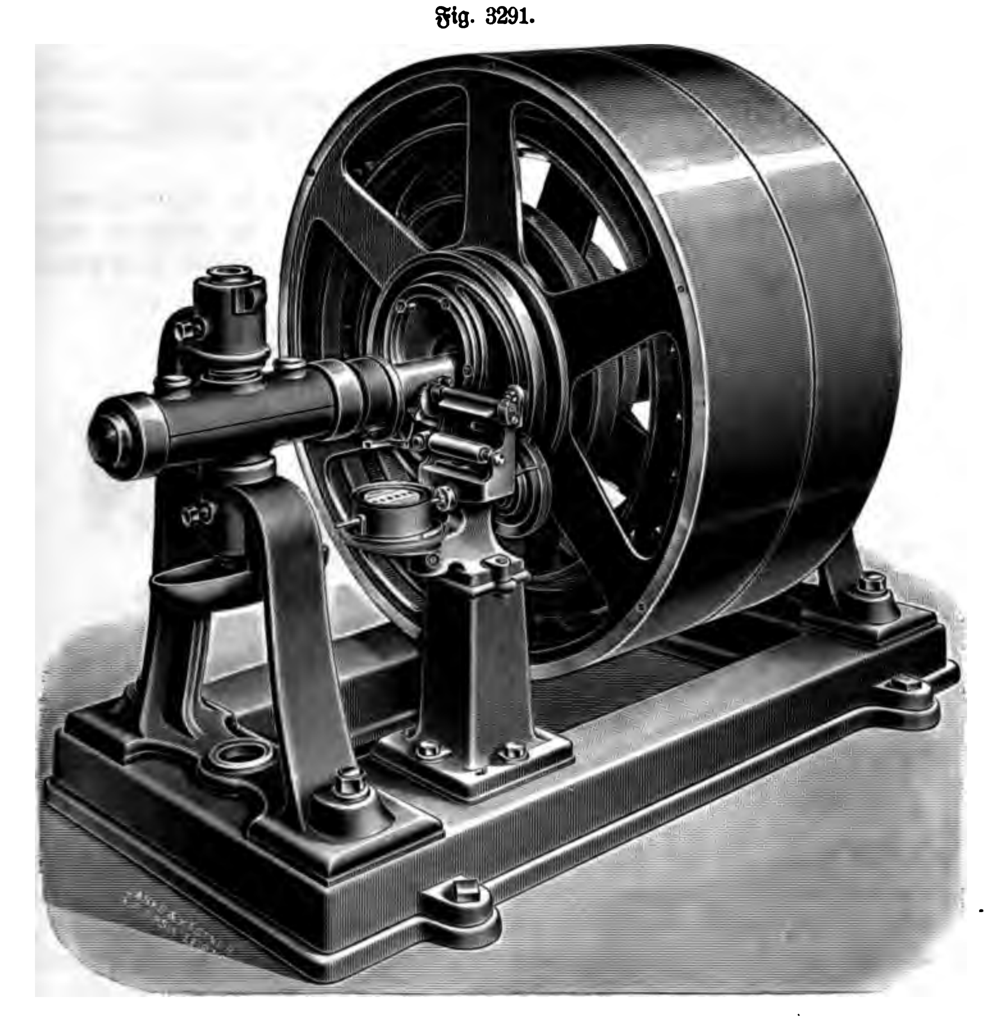
---

[1]) Sie ist zu beziehen von Beck u. Rosenbaum in Darmstadt zu 120 Mk. — [2]) Bremsen von Wasser-, Luft-, Dampf-, Gasmotoren u. s. w. können hier eventuell gezeigt werden, gehören aber eigentlich erst in die späteren Kapitel, welche den Wirkungsgrad dieser Motoren betreffen. — [3]) Ein sehr einfaches Übertragungsdynamometer hat Trouvé in Paris konstruiert (Elektrotechn. Zeitschr. 1890, S. 403).

Eine andere hierher gehörige Vorrichtung ist der in Fig. 3291 [1]) dargestellte Arbeitszähler.

Eine Riemenscheibe ist durch eine Spiralfeder mit der Welle verbunden. Die Verdrehung beim Betriebe wird gemessen und ergibt den übertragenen Effekt [2]).

Fig. 3291.



Man kann mit einer solchen Vorrichtung auch die Effektverluste bei verschiedenen Transmissionsarten (Riemen, Zahnräder, Schraube ohne Ende u. s. w.) konstatieren.

Besonders einfach und genau erscheint das in Fig. 3292 dargestellte Dynamo-

[1]) Zu beziehen von der Leipziger Werkzeug-Maschinen-Fabrik vorm. W. v. Pittler, Akt.-Ges., Leipzig-Wahren und Berlin C., Kaiser Wilhelmstr. 48. — [2]) Wollte man den Effektverbrauch irgend einer Arbeitsmaschine, Mühle, Hobelmaschine, Pumpe u. s. w. mit dem Pronyschen Zaum bestimmen, so müßte man in sehr umständlicher Weise die Maschine außer Verbindung mit der Treibachse setzen und dafür die Treibachse mittels des Pronyschen Zaumes derart bremsen, daß die Umdrehungszahl wieder dieselbe ist, falls überhaupt die Geschwindigkeit des Motors von der Arbeitsleistung abhängt, was bei gut regulierten Motoren nicht zutrifft.

meter von Fischinger[1]), dessen Beschreibung nachstehend wörtlich nach dem Prospekte folgt.

Auf einer durchgehenden und auf den Böcken *o* und *o'* gelagerten Welle *a* (Fig. 3293 und 3294) sitzen fest drei Arme *d*, *d'* und *e* (Fig. 3293 und 3295).

An beiden Enden des Armes *d* befinden sich zwei Lager *l* und *m* (Fig. 3292 und 3293), in welchen die Welle *i* parallel zu *d* lagert.

Diese Welle *i* trägt wiederum an ihrem unteren Ende einen Hebel *g*, an dem oberen den Doppelhebel *kk'* (Fig. 3294 und 3295). Beide Arme des letzteren greifen rechts und links zwischen die im Innern der Riemscheiben *c* und *c'* angegossenen Vorsprünge *nn'* und *vv'* (Fig. 3293, 3294 und 3295).

Am äußeren Ende des Armes *e* sitzt der Zapfen *w*, um den sich der Doppelhebel *ff'* dreht (Fig. 3295). Der Arm *f'* des letzteren trägt wiederum einen Zapfen *g'*, welcher in ein Langloch vom Hebel *g* eingreift (Fig. 3295). Das äußere

Fig. 3292.



Ende des letzteren ist mit einer kleinen Spindel mit Gewinde versehen, auf der rechts und links kleine Justiermuttern *hh'* aufgeschraubt sind (Fig. 3294). Um beim plötzlichen Ingangsetzen des Dynamometers einen harten Anschlag des Hebels *g* bezw. der Spindel an die Riemscheibe zu verhindern, sind an den betreffenden Stellen der letzteren kleine Gummipuffer angebracht.

Der Arm *d'* erfüllt die Aufgabe, den Schwerpunkt dieses Hebelsystems in die Achsenmitte zu verlegen, mit Hilfe eines Längsschlitzes, in dem verstellbar ein Bolzen *m'* sitzt, während auf diesem ein Gewicht *e'* ebenfalls verschiebbar angebracht ist.

Das ganze Hebelwerk ist, wie aus der Zeichnung ersichtlich, von den beiden Riemenscheiben *c* und *c'* umschlossen.

In einer bis zur Mitte reichenden axialen Durchbohrung der Welle *a* (Fig. 3293) lagert eine Stange *b*, welche mit dem inneren Ende an dem Hebelarm *f* und mit dem äußeren an dem Hebelarm *r* des um den Zapfen *t* drehbaren Winkelhebels *rr'*

[1]) Zu beziehen von E. G. Fischinger, Ingenieur, Dresden-A., Johann-Georgen-Allee 13, II.

anliegt. Dieser Arm *r* läuft nach unten in eine Spitze aus, welche auf einer Skala spielt, während Arm *r'* ein verschiebbares Gewicht *u* trägt (Fig. 3293 und 3294),

Fig. 3293.

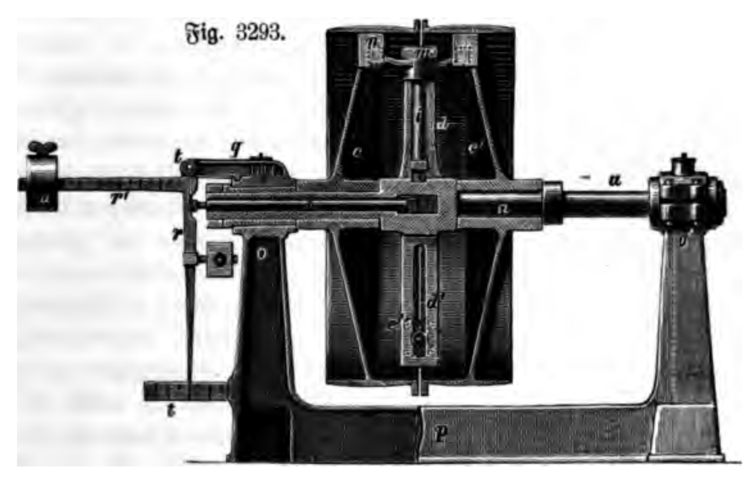


Fig. 3294.

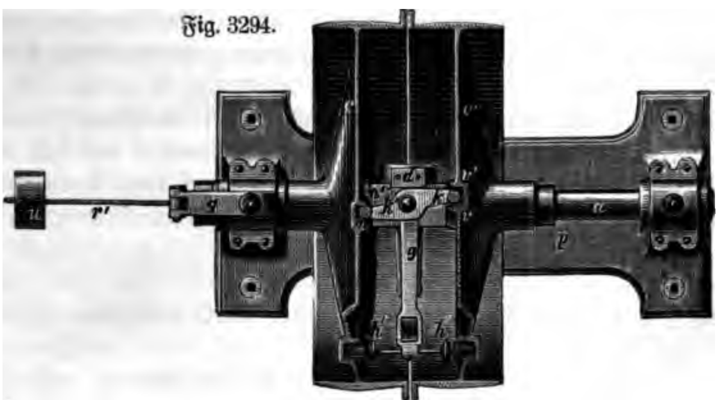


Fig. 3295.



das auch (siehe Fig. 3292) durch eine Wagschale ersetzt werden kann.

Um den Einfluß des Eigengewichtes des Winkelhebelarmes *r'* auf die Messung zu beseitigen, ist auch der Arm *r* mit einem verstellbaren Gewicht versehen. Die bereits oben erwähnten Lagerböcke *o* und *o'* bilden mit der Fundamentplatte *p* ein kompaktes Gußstück, dessen Befestigung am Fußboden sich mit Leichtigkeit bewerkstelligen läßt.

Die Wirkungsweise dieses Übertragungs-Dynamometers ist nun folgende:

Auf die Riemenscheibe *c* (Fig. 3292, 3293 und 3294) wird der Riemen von dem Motor oder der Transmission aufgelegt, auf *c'* der Riemen nach der Arbeitsmaschine. Es wird somit die Kraft vom ersten Riemen durch die beiden Riemenscheiben auf den zweiten übertragen, wodurch naturgemäß

81*

die auf der Welle *a* lose sitzenden Riemenscheiben sich gegeneinander zu verdrehen suchen. Diese Verdrehung wird zunächst durch Hebel *kk'*, Welle *i*, Hebel *g*, Doppelhebel *ff'* und Stange *b* auf den Winkelhebel *rr'* übertragen, dessen Arm *r* auf der Skala *t* die Verdrehung anzeigt, während die Übertragung der rotierenden Bewegung selbst von der einen Riemenscheibe auf die andere durch den Doppelhebel *kk'* erfolgt, wobei dieser also gewissermaßen die Rolle des Mitnehmers übernimmt.

Um zu erfahren, mit welcher Kraft die Verdrehung stattfindet, verschiebt man das Gewicht *u* so weit resp. belastet die Wagschale so stark, bis der Zeiger wieder auf seine Nullstellung zurückkehrt. Der Hebelarm *r'* ist entweder mit einer Einteilung versehen, welche anzeigt, wie viel Gewichtseinheiten der jeweiligen Verdrehungswirkung am Umfang der Riemenscheiben entsprechen oder es wird dies, wie vorher erwähnt, durch direktes Belasten der Wagschale ersehen. Das Resultat der Messung, ausgedrückt in Pferdestärken, erhält man dadurch, daß man die Anzahl der auf der Skala oder auf der Wagschale gefundenen Kilogramme mit der Umfangsgeschwindigkeit (in Metern pro Sekunde) multipliziert und durch 75 dividiert.

Die Vorzüge des vorstehend beschriebenen Dynamometers lassen sich in folgende Punkte zusammenfassen:

1) Die Messungen lassen sich bei den verschiedenen Kraftbeanspruchungen mit gleicher Genauigkeit ausführen, weil der Veränderung unterworfene Federn vermieden sind.

2) Bei verschiedenen Geschwindigkeiten wird immer die gleiche Zuverlässigkeit erzielt dadurch, daß die jedesmalige Einstellung des Zeigers *r* auf den Nullpunkt der Skala *t* eine relativ gleiche Stellung der bewegten resp. rotierenden Teile (Hebel *pp*) ermöglicht, welche die unter anderen Verhältnissen auftretenden störenden Einflüsse der Zentrifugalkraft vermeidet.

3) Das Instrument läßt sich leicht aufstellen.

4) Die Handhabung ist ungemein einfach, weil nur eine Wägung notwendig ist.

5) Das Instrument ist in sehr weiten Grenzen brauchbar.

6) Da keine starker Abnutzung unterworfenen Teile vorhanden sind, so bleibt die Genauigkeit der Instrumente unverändert.

Bei den neueren Apparaten ist die Wagschale (Fig. 3292) durch ein am Hebel schiebbares Laufgewicht ersetzt (Fig. 3293).

546. Stoß unelastischer Körper. Stößt eine mit der Geschwindigkeit U sich bewegende Masse m auf eine ruhende M, so sucht die Kohäsion das Eindringen derselben zu hindern, indem sie der Masse M Beschleunigung erteilt und die Masse m verzögert, bis schließlich beide Körper die gleiche Geschwindigkeit u haben. Durch den Zusammenstoß wird also eine wahre Kraft geweckt, die Stoßkraft, deren Größe dem allgemeinen Satze gemäß dem Produkte von Masse mit Beschleunigung bezw. Verzögerung entsprechen muß. Sie ist, wenn wir der Einfachheit halber die Stoßzeit als Zeiteinheit nehmen, somit die Geschwindigkeitszunahme u der Masse M als Beschleunigung

$$p = M \, . \, u.$$

Einheiten technisch: kg, Hyl und m sec; absolut: Dynen, g und cm sec.

Aus der Verzögerung $U - u$ der Masse m berechnet sich dieselbe Kraft

$$p = m(U - u),$$

somit ist

$$M \,.\, u = m(U - u)$$

und

$$u = \frac{U \,.\, m}{M + m}.$$

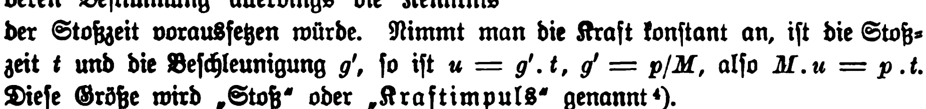
547. **Stoßkraft.** Zur Demonstration des Stoßes unelastischer Körper kann man zwei Sandsäcke benutzen, welche auf kleine Wagen gesetzt sind, die sich auf horizontalem Schienengeleise bewegen können. Einfacher hängt man dieselben an langen an der Decke befestigten Schnüren auf und zwar jeden Sack an zwei nach oben auseinander weichenden Schnüren, damit die Bewegung in einer bestimmten Ebene stattfindet und sich die Säcke beim Stoß genau in der Mitte treffen [1]).



Fig. 3296.

Von besonderem Interesse ist das ballistische Pendel, welches in gleicher Weise eingerichtet werden kann, indem man dabei eine mit Sand oder Lehm gefüllte, an einer Seite teilweise offene Kiste verwendet. Zum Hineinschießen der Kugel kann eine Federbüchse, Armbrust oder eine nach dem Prinzip der alten Kriegsmaschinen [2]) eingerichtete Schleudermaschine, besser eine Windbüchse oder Pistole dienen. Aus der Steighöhe des Pendels ergibt sich die potentielle Energie, die es aufgenommen hat, somit die ihr entsprechende Bewegungsenergie des Geschosses nach dem Stoß [3]) und daraus dessen Geschwindigkeit. (Siehe § 546.)

Die Stoßkraft ergibt sich aus der Masse des stoßenden Körpers und der mittleren Geschwindigkeitsänderung in der Zeiteinheit, deren Bestimmung allerdings die Kenntnis



der Stoßzeit voraussetzen würde. Nimmt man die Kraft konstant an, ist die Stoßzeit t und die Beschleunigung g', so ist $u = g'.t$, $g' = p/M$, also $M.u = p.t$. Diese Größe wird „Stoß" oder „Kraftimpuls" genannt [4]).

Eine Fallmaschine, beruhend auf der Messung der Stärke des Stoßes beim Auffallen des Fallkörpers durch Vergleich mit der Stoßkraft eines zu gleicher Zeit in seinem tiefsten Punkte ankommenden Pendels, beschreibt O. Reichel, Z. 5, 229, 1892.

Maey (Z. 15, 272, 1902) mißt die Bewegungsenergie eines fallenden Körpers durch dessen Durchschlagskraft, indem er ihn auf einen mit Papier bespannten Rahmen auffallen läßt. Reicht die Kraft eben zu, das Papier zu durchschlagen

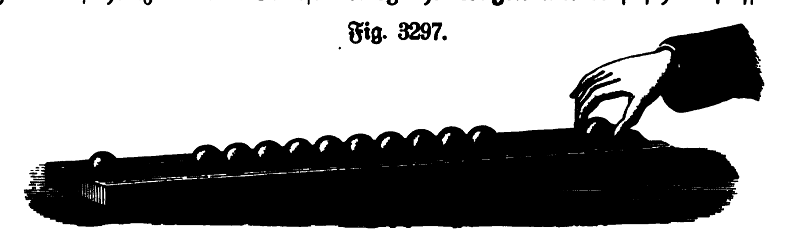
[1]) Die Deformation einer unelastischen Kugel kann an einer beim Auftreffen plattgedrückten Pistolenkugel gezeigt werden. — [2]) Die Ballisten entsprachen unseren Mörsern für Steilwurf, die Katapulten den Kanonen für Flachwurf. — [3]) Der Stoß ist mit Energieverlust verbunden. Ist z. B. $m = M$, so wird $u = \frac{1}{2}U$, somit ist die Energie nach dem Stoß $2.m.\frac{1}{8}U^2$, während sie vorher $m.\frac{1}{2}U^2$, also doppelt so groß war. — [4]) Der Stoß oder die Bewegungsgröße beträgt 1 CGS, wenn die Masse 1 CGS die Geschwindigkeit 1 CGS erhält.

und verwendet man sodann ein Gewicht von halber Größe, so zeigt sich, daß die Fallhöhe die doppelte sein muß. Die Aufschlagstellen müssen in möglichst gleicher Entfernung vom Rande sein.

Hier wären auch die Stoßkräfte der Hämmer und ähnlicher Werkzeuge zu besprechen, insbesondere die Wirkung eines Rammbärs, Fig. 3296 (Lb, 30), eventuell auch die Stoßwirkungen bei Strömung plastischer Massen (Sandrutschungen, Faltenbildung der Erdrinde, Gletscher).

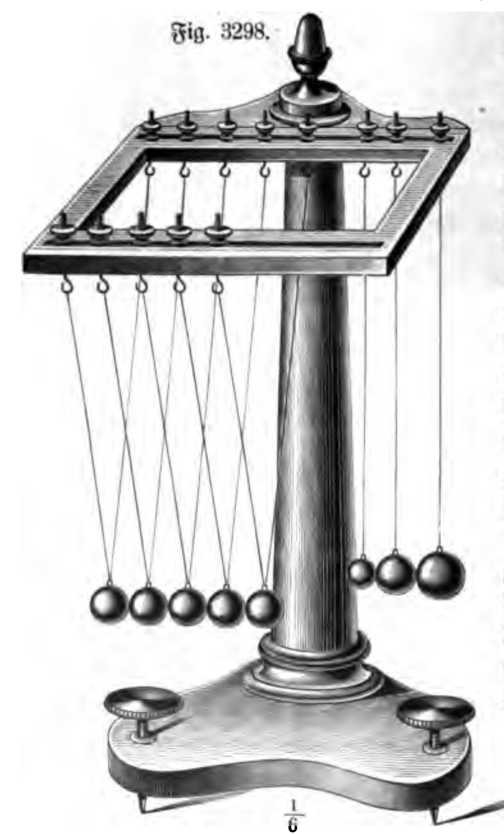
548. Elastischer Stoß. Zur Demonstration des elastischen Stoßes kann man zwei auf horizontalem Geleise bewegliche Wagen mit elastischen Puffern, wie

Fig. 3297.



sie die Eisenbahnwaggons besitzen, benutzen. Einfacher gebraucht man zu gleichem Zwecke Kugeln aus Elfenbein oder Stahl (Fig. 3297) in einer genau horizontal gestellten glatten Rinne[1]), oder den in Fig. 3298 dargestellten Stoßapparat mit pendelnden Elfenbeinkugeln, von welchen man etwa fünf bis sechs gleich große, dann eine vom doppelten und eine vom halben Gewichte hat. Bei größerer Geschwindigkeit fallen die Versuche unvollkommen aus, wegen der unvollkommen Elastizität des Elfenbeins. Besonders sorgfältig muß man bei dem Versuche mit einer Reihe gleich großer Kugeln darauf sehen, daß dieselben in der Ruhe einander nur berühren und keinen Druck gegeneinander ausüben, sowie daß ihre Mittelpunkte in derselben Geraden liegen.

Fig. 3298.



$\frac{1}{6}$

Um letzteres vollkommen zu erzielen, bringen einzelne Mechaniker zwischen den Fäden noch einen cylindrischen Körper an, der dieselben hindert, seitwärts aus der Reihe zu treten. (L, 31,50 bis 50. E, 12 bis 90.)

Sind die Körper vollkommen elastisch, so wird die beim Zusammenstoß eintretende Deformation, nachdem die Geschwindig-

[1]) Tyndall benutzt Glaskugeln, welche in einer Holzrinne sich bewegen, die durch Stellschrauben horizontal gerichtet wird (Lb, 16,50).

keit beider Körper zunächst wie beim unelastischen Stoß gleich geworden ist, wieder verschwinden, wobei die Masse M aufs neue eine Beschleunigung erfährt, so daß ihre Geschwindigkeit V wird, während m abermals verzögert wird und nur noch die Geschwindigkeit v behält.

Da die Kraft, mit welcher sich die deformierten Körper wieder zur ursprünglichen Form ausdehnen, dieselbe ist, mit welcher sie deformiert wurden, und da sie sich aus den Geschwindigkeitsänderungen berechnet zu

$$p = M(V - u) \quad \text{oder} \quad p = m(u - v),$$

so folgt

$$M(V - u) = Mu \quad \text{und} \quad m(u - v) = m(U - u),$$

somit

$$V = 2u \quad \text{und} \quad v = 2u - U.$$

Wären beispielsweise die beiden Massen gleich, etwa zwei gleich große Elfenbeinkugeln, so wäre

$$u = {}^1/_2\, U$$

und

$$V = U \qquad v = 0,$$

d. h. die gestoßene Kugel nimmt die Geschwindigkeit der ruhenden an, während die stoßende zur Ruhe kommt.

Wäre die Masse M sehr groß, so würde

$$u = 0$$

und

$$V = 0 \qquad v = -U,$$

d. h. die stoßende Kugel prallt von der gestoßenen mit derselben Geschwindigkeit zurück, mit welcher sie aufgestoßen war.

Man kann hieraus deutlich ersehen, daß der elastische Stoß nicht wie der unelastische mit Energieverlust verbunden ist.

Stößt eine elastische Kugel gegen eine in der Stoßrichtung liegende Reihe anderer gleich großer elastischer Kugeln, so überträgt jede sofort den Stoß auf die folgende und bleibt sodann in Ruhe, nur die letzte Kugel wird abgestoßen. Der Stoß hat sich, wie man sagt, durch die Kugelreihe fortgepflanzt (Fig. 3299, oben).

Fig. 3299.

Setzt man vor eine Reihe großer Elfenbeinkugeln eine solche aus kleinen (Fig. 3299, unten), und läßt durch letztere einen Stoß sich fortpflanzen, so beobachtet man an der Grenze der beiden Reihen eine Reflexion des Stoßes. Ersetzt man die zweite Reihe durch einen schweren Marmorklotz, so kehrt der Stoß an der Grenze vollständig um und bringt schließlich die erste Kugel zum Abspringen.

An Stelle der teuren Elfenbeinkugeln kann man auch (nach Drentelen, Z. 7, 272, 1894) die billigen Knochenringe verwenden (vielleicht auch Celluloidbälle).

Bestreut man die Elfenbeinkugeln des Stoßapparates mit Feilspänen und läßt die erste gegen die übrigen fallen, so werden nach Trève (1882) von den Zwischenkugeln die Späne auf der Hälfte abgeschleudert, welche der stoßenden Kugel abgewendet ist; von der abspringenden letzten Kugel dagegen von der anderen Hälfte. (Erscheinungen bei Erdbeben.)

549. Reflexion. Stößt eine elastische Kugel schief gegen eine ausgedehnte ebene Platte, so läßt sich ihre Bewegung U (Fig. 3300) nach dem Gesetze des Parallelogramms der Bewegungen zerlegen in eine Bewegung u_1 parallel zur Platte und eine Bewegung u_2 senkrecht dazu. Nur die letztere wird durch den Stoß geändert und wie im vorigen Falle in $-u_2$ verwandelt. u_1 und $-u_2$ setzen sich alsdann zu der resultierenden Bewegung U_1 zusammen, deren Winkel r mit der auf der reflektierenden Fläche errichteten Senkrechten, dem Einfallslot, gleich dem Einfallswinkel i ist.

Die Versuche über den schiefen Stoß gegen eine Ebene können einfach so angestellt werden, daß man eine polierte Marmortafel (Fig. 3301) senkrecht auf einen Tisch stellt und an irgend einem Gestelle eine Kugel an einem einzelnen Faden aufhängt (Fig. 3302).

Jeder Rest einer marmornen Tisch- oder Ofenplatte dient für diesen Versuch, nachdem er vom Steinhauer quadratisch zugerichtet ist. Am zweckmäßigsten ist es vom Schreiner eine Zarge von Holz mit vorstehendem Rande um die Platte machen zu lassen und sie mit Gips in derselben zu vergießen (Fig. 3301).

Fig. 3300.

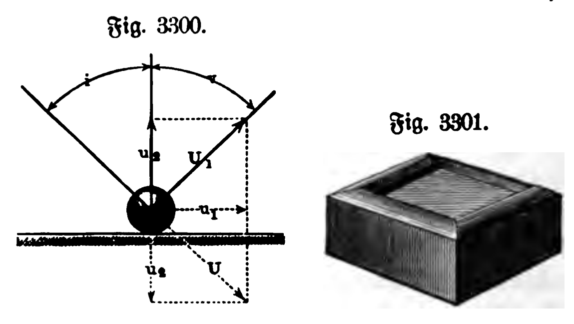
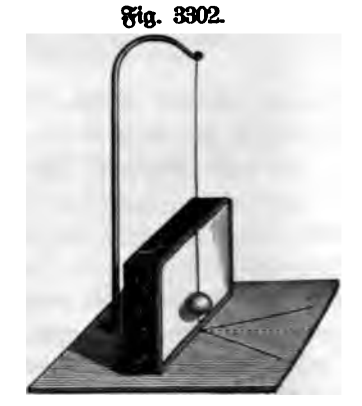


Fig. 3301.

Fig. 3302.



Der Gips wird mit Wasser zu einem dünnen Brei angerührt und über die Platte von unten gegossen, nachdem diese auf die etwas übergreifenden Ränder der Zarge gelegt ist. Nachdem der Gips hart geworden, wird er unterhalb geebnet und ein hölzerner Boden auf die Zarge geschraubt, wobei man noch etwas ganz dünnen Gipsbrei vorher aufgießt.

Man zeichnet dann vorher die Winkel auf den Tisch und läßt die Kugel in der Richtung des einen Schenkels gegen die Platte schlagen. Je unvollkommener die Elastizität der gebrauchten Kugel ist, desto kleiner fällt der Zurückwerfungswinkel aus, im Vergleiche mit dem Einfallswinkel, besonders wenn dieser groß ist. Allein bei Elfenbein tritt während der Zusammendrückung auch noch ein Gleiten der Kugel auf der Tafel ein, wodurch die mit der Tafel parallele Geschwindigkeit vermindert wird und die Kugel nach mehreren Schlägen nur noch senkrecht von der Platte abspringt. Einmal geht aber der Versuch recht gut. Auf einem Billard lassen sich die Gesetze des Stoßes weniger gut erklären, wenigstens nicht für den Anfang, da hier die Kugeln außer der gleitenden Bewegung, die bei schwachem Stoße auch ganz fehlt, noch eine rotierende haben, deren Richtung bald mit der gleitenden zusammenfällt, bald ihr entgegenwirkt, ja auch einen Winkel mit ihr macht.

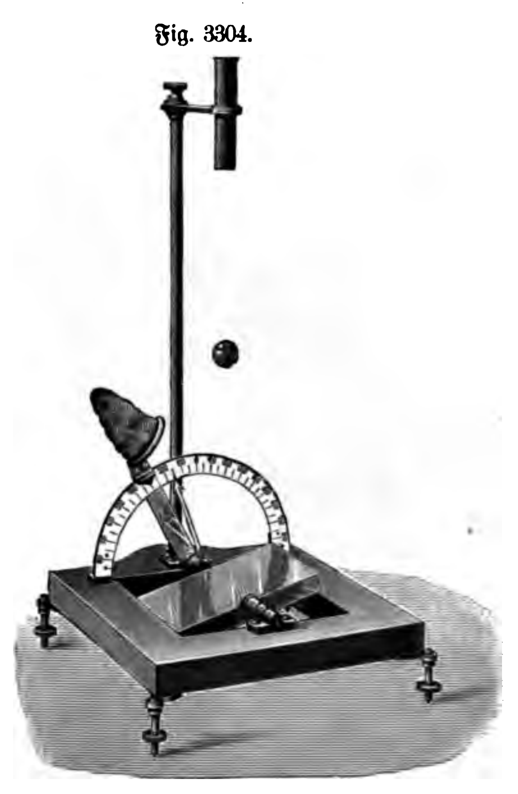
Daguin gibt der Vorrichtung folgende Form. Auf einer durch Stellschrauben horizontal zu richtenden halbkreisförmigen (3 mm dicken) Metall-(Zink-)Platte (Radius

= 26 cm) mit Teilung am Rande, welche zweckmäßig auf einem schief abwärts gerichteten (also eine konische Fläche bildenden) Rande in starken schwarzen Strichen auf weißem Grunde aufgetragen wird, ist im Kreismittelpunkte, parallel zur ebenen Begrenzungslinie, eine Marmortafel (8 cm breit, 5 cm hoch) senkrecht befestigt, wie bei Fig. 3302. Gegen diese wird nun die Elfenbeinkugel mittels einer Federbüchse (mit zwei Visieren, über welche man nach der durch einen Strich markierten Mitte zielt) abgeschossen, und nach der Reflexion von einem kleinen Mousselinbeutel aufgefangen. Federbüchse und Beutel sind an drehbaren Armen befestigt, lassen sich durch Schrauben feststellen und zeigen auf der Teilung ihre Stellung an. (Fig. 3303 Lb, 50; 3304 E, 50.)

Fig. 3303.



Fig. 3304.



Daß sich die Elfenbeinkugeln beim Stoße abplatten, zeigt man dadurch, daß man eine elfenbeinerne Kugel von etwa 1 bis 2 cm Durchmesser auf eine Marmorplatte fallen läßt. Man braucht eine solche Platte nur anzuhauchen, um zu zeigen, daß die Kugel je nach der Fallhöhe einen mehr oder weniger breiten Fleck durch ihr Aufschlagen auf der Platte zurückläßt; man sieht diese Flecke besser, wenn man die Tafel etwas schief gegen das Licht hält. Hellfarbige Platten kann man mit Lampenruß schwärzen, wodurch die Flecke deutlicher werden. Die Platte wird vor dem Versuche durch Keile horizontal gestellt, damit die Kugel wieder senkrecht aufspringt und man dieselbe nicht erst wieder auf dem Boden suchen muß. Am einfachsten fängt man die aufspringende Kugel sogleich, ehe sie wieder auf die Platte fällt. (W, 9.)

Die unvollkommene Elastizität des Elfenbeins zeigt sich besonders auffallend beim schiefen Stoße zweier gleich großer Kugeln, wovon die eine in Ruhe ist; hier sollten für vollkommene Elastizität die gestoßene und die stoßende Kugel nach dem Stoße unter einem rechten Winkel auseinanderlaufen[1]).

---

[1]) Apparate für schiefen Stoß liefert H. Köpping, Institut f. phys. Instrumente, Nürnberg, Flaschenhofstr. 24.

550. Wirkung von zwei gleichzeitigen Stößen. Einer der Versuche, die zusammengesetzte Wirkung zweier Kräfte zu zeigen, besteht darin, daß man zwei gleich große pendelartig aufgehängte Elfenbeinkugeln gegen eine dritte von derselben Größe stoßen läßt. Soll der Versuch gelingen, so müssen die beiden zum Stoße bestimmten Kugeln mittels dünner Stäbchen an horizontalen Achsen, die an stählernen Spitzen laufen, leicht beweglich aufgehängt sein, so daß sie sich nur längs eines Kreisbogens bewegen können. Diese beiden Kreisbogen sind beweglich untereinander verbunden und können ihre Richtung gegen die mittlere Kugel nur gemeinschaftlich und um gleich viel ändern. An jedem der eingeteilten Kreisbogen ist ein verstellbarer Anhalt für die Kugeln, hinter welchen sie getan werden. Wenn die mittlere Kugel recht vollkommen ruhig hängt und man rückt plötzlich die beiden Kreisbogen, so fallen beide Kugeln pendelartig herunter, stoßen die mittlere, und diese bewegt sich nach einem anderen geteilten Kreisbogen hin. Waren beide Kugeln gleich hoch gestellt, so muß die mittlere auch gegen die Mitte dieses Bogens gehen [1]).

Oſann (1857) hängt an dem Stoßapparat nicht nur eine Reihe Elfenbeinkugeln auf, sondern zwei sich kreuzende Reihen. Läßt man dann gleichzeitig die äußersten Kugeln

Fig. 3305.

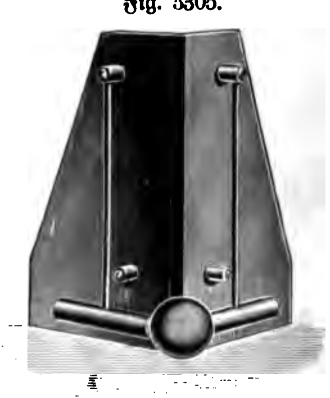


Fig. 3306.



an zwei Enden des Kreuzes fallen, so sieht man auch die Kugeln an den anderen beiden Enden gleichzeitig abspringen und zwar genau ebenso, als ob jeweils nur eine Kugel gestoßen hätte. Zwei Stöße stören sich somit in ihren Wirkungen nicht. Der Versuch dient zur Erläuterung der Fortpflanzung sich durchkreuzender Schallwellen.

Den in Fig. 3306 dargestellten Apparat zur Zusammensetzung von Stoßkräften nach Reichel findet man beschrieben in Z. 7, 73, 1893 [2]).

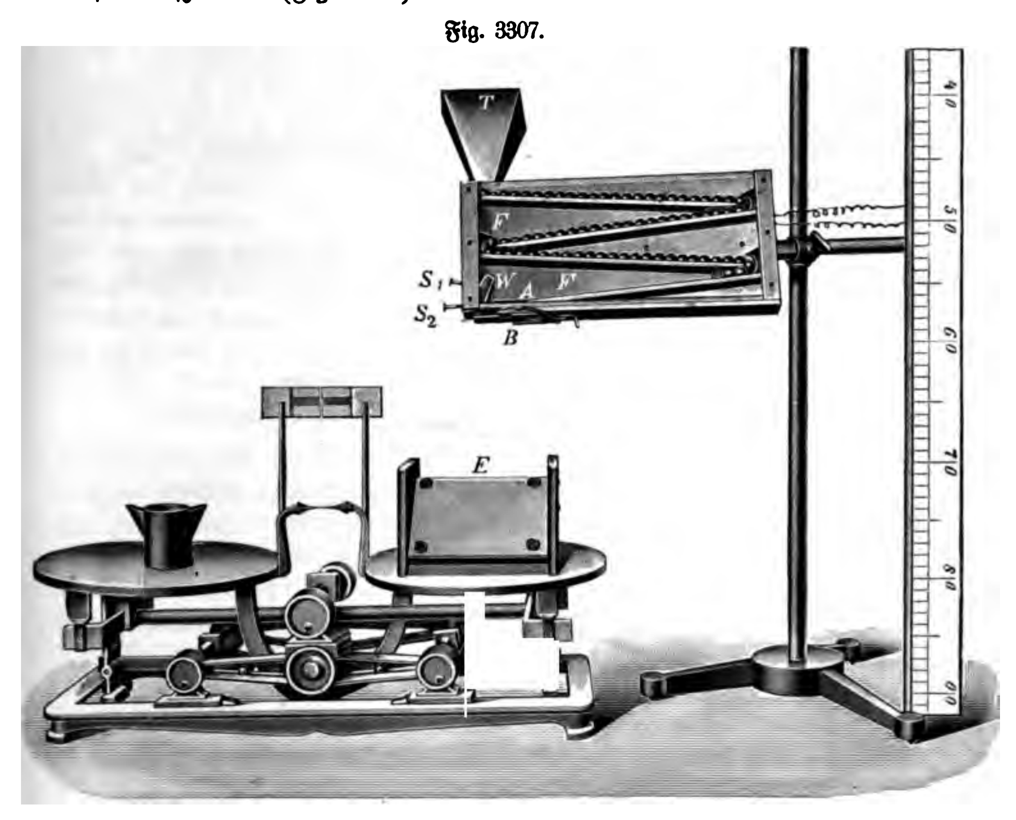
Einen Apparat, welcher den mittleren Druck zu messen gestattet, welchen im gleichen Tempo auf eine Platte auffallende Fahrradstahlkugeln hervorrufen, be-

---

[1]) Ein Stoßapparat nach Weinhold mit zwei rechtwinklig gegeneinander beweglichen Buchsbaumhämmern, welche durch Anschlagen eine 40 mm große Elfenbeinkugel in diagonaler Richtung treiben (Fig. 3305), ist zu beziehen von G. Lorenz in Chemnitz zu 13 Mk. — [2]) Versuche über Zusammensetzung paralleler Stoßkräfte siehe Heyne, Z. 7, 75, 1893.

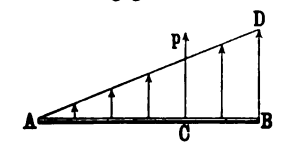
schreibt Fenzl (Z. 15, 143, 1902). Derselbe ist hauptsächlich bestimmt, die kinetische Gastheorie zu erläutern, sowie die Stoßkraft von Wasserstrahlen u. s. w. Er kann auch dazu dienen, den Unterschied zwischen Trägheitskräften und wahren Kräften aufzuklären (Fig. 3307).

Fig. 3307.



551. Mittelpunkt des Stoßes. Soll ein Stab AB durch eine Kraft p so gestoßen werden, daß er sich um den Punkt A dreht und auf die Drehachse keinen Druck ausübt, so muß p an einem Punkte C (dem „Mittelpunkt des Stoßes") angreifen, dessen Entfernung von $A = {}^2/_3 AB$ ist. Dies ergibt sich ohne weiteres aus dem Prinzip von d'Alembert. Man denke sich den Stab aus gleich großen Teilchen zusammengesetzt, deren Beschleunigungen, somit auch Trägheitswiderstände, durch die Pfeile der Fig. 3308 dargestellt sind. Fügt man diese Trägheitskräfte als wahre Kräfte in entgegengesetzter Richtung zu p hinzu, so hat man dieselbe Gleichgewichtsbedingung, wie wenn AB ein Hebel mit ungleichmäßiger Belastung wäre, oder wie wenn untersucht werden soll, wie eine dreieckige Platte ABD aufgehängt werden muß, damit sie in der gezeichneten Lage im Gleichgewicht ist. Die Linie durch den Schwerpunkt, welcher auf ${}^2/_3$ der Höhe liegt, muß dann durch C gehen.

Fig. 3308.



Soll eine Stange so gestoßen werden, daß nur Translation, keine Drehbewegung eintritt, so muß die Kraft p im Schwerpunkt C angreifen (Fig. 3309), denn man hat nach demselben Prinzip den Fall eines gleichmäßig belasteten Hebels.

Soll sich die Stange AB um ihren Mittelpunkt C drehen (Fig. 3310), so müssen zwei gleiche und entgegengesetzte Kräfte p in je $^3/_4$ der halben Länge von C entfernt angreifend wirken. Dieselben bilden ein **Kräftepaar**. Dasselbe kann durch irgend ein anderes, welches gleiches Moment hat, ersetzt werden.

Wirkt auf AB, Fig. 3311, gleichzeitig eine Kraft P in C und ein Kräftepaar in N und M, so tritt gleichzeitig Parallelverschiebung und Drehung ein, welche Bewegungen im ersten Augenblick einer Drehung um den Punkt O entsprechen. Die in C und M angreifenden gleichgerichteten Kräfte P und p lassen sich durch eine einzige Kraft ersetzen, welche das gleiche Drehmoment bezüglich O hat, wie beide zusammen; die andere Kraft p in N kann ersetzt werden durch eine solche von gleichem Moment auf der anderen Seite von O, und diese zusammen mit der vorigen durch eine Resultante, die nicht durch C geht. Umgekehrt kann man also sagen: Wird die Stange nicht im Schwerpunkt gestoßen, so erfährt sie gleichzeitig eine Drehung und eine Parallelverschiebung oder dreht sich um einen Punkt außerhalb des Schwerpunkts.

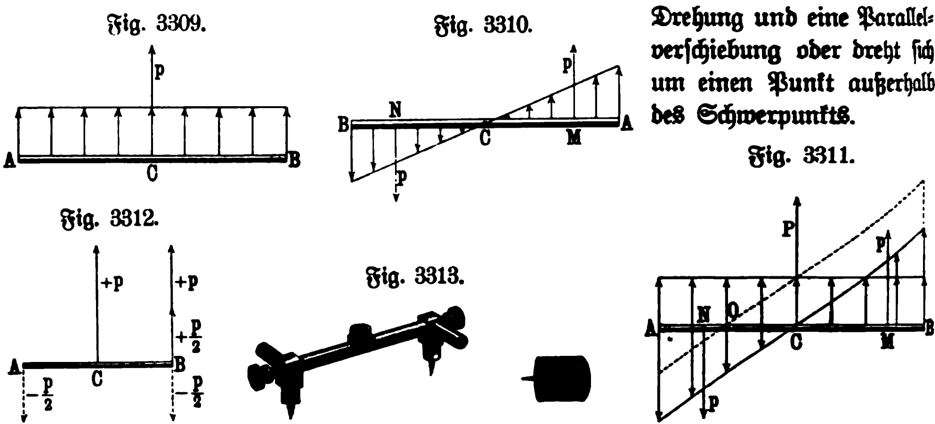


Fig. 3309. Fig. 3310. Fig. 3311. Fig. 3312. Fig. 3313.

Man kann dies auch aus Fig. 3312 erkennen. Die Kraft $+p$ wirke an B. Man füge eine gleich große Kraft $+p$ in C und zwei entgegengesetzte Kräfte $-\frac{p}{2}$ in A und B hinzu, die unter sich im Gleichgewicht sind, also nicht stören. In B hat man dann $+\frac{p}{2}$, in A $-\frac{p}{2}$, ein Kräftepaar bildend, welches den Stab dreht, in C die Kraft $+p$, welche Parallelverschiebung bewirkt.

Grimsehl benutzt zur Demonstration der Kräftepaare eine zweimal rechtwinklig geknickte Doppelkanone [1]) (Fig. 3313). Sie wird mit den Spitzen in ein unten mit einer Spiegelglasplatte belegtes Brett gedrückt, welches sich auf zahlreichen polierten Stahlkugeln auf einer mit Billardtuch überzogenen und mit vorstehendem Rand versehenen Glasplatte nach allen Richtungen frei bewegen kann. Damit der Schwerpunkt des Bretts durch das Aufsetzen der Kanone nicht verändert wird, wird an der gegenüberliegenden Seite das in Fig. 3313 rechts gezeichnete gleich schwere Gewicht mit Spitze befestigt. Das Zündloch der Kanone befindet sich in der Mitte, die beiden Schrauben mit Rändelkopf dienen dazu die Bohrung des axialen Rohres zu verschließen und auch zum Auswaschen des Pulverschleims nach beendigtem Versuch. Die in beiden Seitenrohren einzusetzenden Projektile sind die Zapfen der in Fig. 3314 an Schnüren aufgehängten Gewichte. Sie werden beim Abfeuern

[1]) Grimsehl, Z. 17, 321, 1904.

der Kanone durch Berühren des in der Pfanne über dem Zündloch befindlichen Pulvers mit solcher Kraft herausgeschleudert, daß sich die Schnüre mehrmals um die Stangen herumwickeln, an welchen sie aufgehängt sind, wodurch der weitere Vorteil erzielt wird, daß die Bewegung des Brettes durch sie nicht beeinträchtigt wird. Welche Stellung man der Kanone auf dem Brett geben mag, immer dreht sich dasselbe beim Abfeuern der Kanone genau um seinen Schwerpunkt ohne eine translatorische Bewegung anzunehmen.

Anders verhält es sich, wenn nur eine einfache Kanone mit einem einzelnen Geschoß benutzt wird, Fig. 3315. Geht die Richtung des Rückstoßes durch den

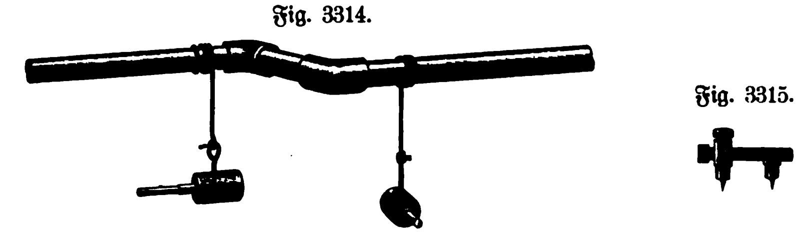


Fig. 3314.

Fig. 3315.

Massenmittelpunkt, so resultiert eine rein translatorische Bewegung des Körpers, während dieselbe beim exzentrischen Stoß mit einer Drehbewegung verbunden ist. Um speziell bei zwei starr verbundenen Massen (Fig. 3316) einzusehen, daß sich die beiden Massen um den gemeinsamen Schwerpunkt drehen müssen, kann man nach Grimsehl folgende Überlegung anstellen. Die Kraft $K_1 = m_1 \cdot \gamma_1$, $K_2 = m_2 \cdot \gamma_2$, wenn γ_1 und γ_2 die beiden Beschleunigungen sind. Ferner ist $s_1 = {}^1/_2 \gamma_1 \cdot t^2$, $s_2 = {}^1/_2 \gamma_2 \cdot t^2$, $x_1 : x_2 = s_1 : s_2 = {}^1/_2 \gamma_1 \cdot t^2 : {}^1/_2 \gamma_2 \cdot t^2 = \gamma_1 : \gamma_2$ und $m_1 x_1 : m_2 x_2 = m_1 \cdot \gamma_1 : m_2 \gamma_2$; da letztere gleich sind, ist auch $m_1 x_1 = m_2 x_2$, d. h. der Drehpunkt der Schwerpunkt der beiden Massen.

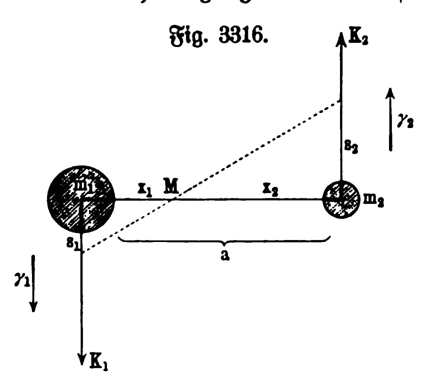


Fig. 3316.

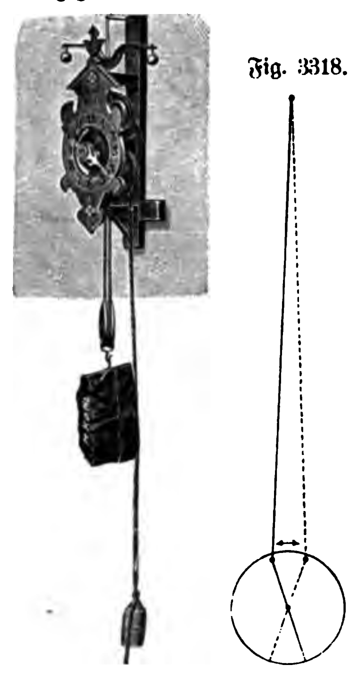
552. **Stoßmotoren.** Mocenigo (1880) macht darauf aufmerksam, daß man die Stoßkraft von Sand zum Betrieb eines Motors verwenden kann, z. B. indem ein Pendel zwischen zwei Gefäßen hin- und herschwingt und dabei jeweils eine Klappe öffnet, worauf es durch den austretenden Sand einen neuen Anstoß erhält. Ebenso könnte man ein Wasserrad durch Sand treiben, derselbe häuft sich aber bald an, fließt nicht fort wie Wasser; aus diesem Grunde bleibt ein Apparat solcher Art bald stehen.

553. **Trägheitspendel.** Der Trägheitswiderstand bewirkt, daß eine gewisse Zeit notwendig ist, um einen Körper um eine bestimmte Strecke fortzubewegen oder zu drehen. Hierauf beruht die Wirkung der sogenannten Wag bei alten Räderuhren, wie Fig. 3317 (K, 16). Ein an beiden Enden mit Gewichten belasteter horizontaler Stab kann sich um eine vertikale Achse drehen, die mit zwei seitlichen Vorsprüngen versehen ist, von denen der eine oben, der andere unten zwischen die Zähne eines Kronrades eingreift, aber so, daß immer nur einer derselben gedrückt wird. Wird z. B. der obere gedrückt, so dauert es eine gewisse Zeit, bis sich die

Wag so weit gedreht hat, daß der Vorsprung außer Berührung mit dem Zahn kommt. In diesem Momente kommt aber der untere Vorsprung zum Eingriff und die Wag wird wieder zurückgedrückt, worauf sich das Spiel wiederholt. Weil die Zeit eines Hin- und Herganges eine bestimmte ist, die bei gegebener treibender Kraft von dem Trägheitsmoment, d. h. dem Gewicht und Abstand der beiden Massen der Wag abhängt, so kann sie zur Regulierung des Ganges von Uhrwerken dienen; doch ist die Methode sehr unvollkommen, weil die Schwingungsdauer von der treibenden Kraft abhängt, d. h. der Differenz zwischen der durch das ziehende Gewicht ausgeübten Kraft und den mit der Zeit veränderlichen Reibungswiderständen. Aus diesem Grunde kann auch z. B. eine Bremse nicht zur Regulierung dienen. Ein anderes Beispiel eines Trägheitspendels bildet das oscillierende Schwungrad, welches man sich herstellen kann mittels eines großen schweren Wellrades (z. B. dem Rade einer Milchzentrifuge), wenn man auf die Welle eine über eine Rolle geführte ungedrehte (geklöppelte) Schnur sich aufwinden läßt, welche am anderen Ende durch ein Gewicht gespannt ist. Sinkt das Gewicht herunter, so verwandelt sich seine potentielle Energie in Bewegungsenergie des Schwungrades, welche bewirkt, daß sich die Schnur nach völligem Ablaufen wieder in entgegengesetzter Richtung aufwindet und das Gewicht wieder gehoben wird, so daß sie schließlich wieder vollständig in potentielle Energie übergeht. (S. auch S. 1224.)

Fig. 3317.

Fig. 3318.



Bei dem bekannten Spielzeug „Joujou" (Rolle mit aufgewickelter Schnur) bildet die Rolle selbst das sinkende Gewicht und haspelt sich, nachdem sie heruntergesunken, von selbst wieder vermöge ihrer Bewegungsenergie an der Schnur in die Höhe.

Fig. 3319.



Analog ist der in Fig. 3318 dargestellte eigenartige Fall von Schwingungen, auf welchen Fr. C. G. Müller (1888) aufmerksam macht. Eine kreisförmige Blechscheibe (20 cm Radius) ist an einem Faden aufgehängt und wird so gedreht, daß der Aufhängepunkt aus der Lotlinie heraustritt. Sie pendelt dann um ihr Zentrum, wie die Figur andeutet.

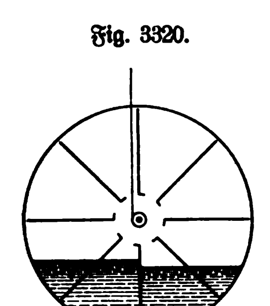
Ferner gehört hierher auch das fliegende Pendel, Fig. 3174. Zu beiden Seiten einer sich drehenden vertikalen Achse befinden sich zwei vertikale Säulen. Ein bis nahe zu diesen Säulen heranreichender, senkrecht an der Achse befestigter Arm trägt ein einfaches Fadenpendel. Indem sich dieses bald um die eine, bald um die andere Säule herumwickelt, wird in regelmäßigen Pausen der Lauf der Achse gehemmt.

Auch das Quecksilbermännchen, welches in regelmäßigen Pausen sich überschlagend eine Treppe hinunterturnt (s. Fig. 3536, S. 1388) oder die chinesischen Treppenläufer, Fig. 3319 (Lb, 2,5 bis 6), oder das einfachere Spielzeug,

bei welchem im Innern der hohlen Puppe, die sich überschlagend eine schiefe Ebene hinunterpurzelt, eine schwere Kugel enthalten ist, die sich hin- und herschieben kann, gehören hierher.

Bei der früher viel gebrauchten Walgeruhr¹) hängt eine Trommel mit horizontaler Achse an zwei parallelen Schnüren, deren Enden um die vorstehenden Enden der Achse gewickelt sind (Fig. 3320). Sie ist im Innern mit radialen Kammern versehen, welche am Rande durch feine Öffnungen miteinander kommunizieren. Natürlich sucht die Trommel unter Abwickelung der Schnüre herunterzusinken, dabei wird aber der Wasserinhalt der Kammern auf Seite der Schnüre gehoben und hierdurch der Schwerpunkt in die Achse verlegt, so daß das Kraftmoment gleich Null wird. Erst nachdem Wasser durch die Öffnungen durchgesickert ist, kann sich das Abrollen fortsetzen u. s. w. Die vorragenden Zapfen bewegen sich vor einem Zifferblatt, an welchem die Zeit abgelesen werden kann. Die Bewegung ist hier allerdings keine hin- und hergehende oder stoßweise, sondern gleichmäßig fortschreitende.

Während bei dem Stoßpendel die Geschwindigkeit durch Stoß plötzlich erzeugt wird und während der Bewegung des Pendels konstant bleibt, ist sie bei dem gewöhnlichen Pendel beschleunigt oder verzögert, da die Kraft fortwährend wirkt. Ein Fall dieser Art wurde schon in § 503, S. 1233 behandelt, nämlich das Wiederaufsteigen eines längs einer schiefen Ebene herabfallenden Körpers auf einer zweiten entgegengesetzten schiefen Ebene.


Fig. 3320.

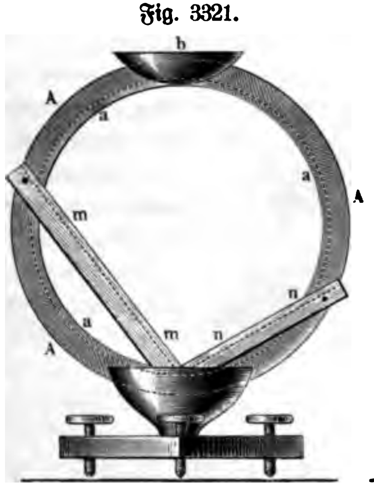


Fig. 3321.

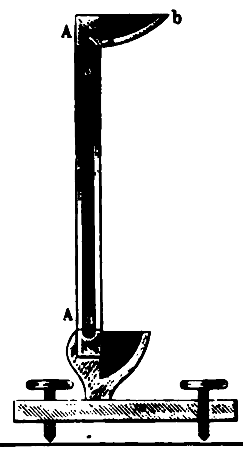


Fig. 3322.

554. Das Pendel. Durch Bremsen eines Uhrwerks bis zur Gleichheit von Reibung und treibender Kraft kann man wegen des Wechsels der Reibung nur in unvollkommener Weise gleichförmigen Gang erzielen. Besser wird dieser Zweck erreicht durch Anwendung einer Schwungradbremse, wobei durch die Wirkung eines Zentrifugalregulators der Druck auf die Bremse sich verstärkt, wenn die Geschwindigkeit sich über die normale erhöht, und vermindert, wenn sie geringer wird.

Das Trägheits- oder Stoßpendel liefert ein noch vollkommeneres Mittel der Regulierung des Ganges, das vollkommenste ist aber, wie Galilei zuerst gefunden hat, das gewöhnliche Pendel.

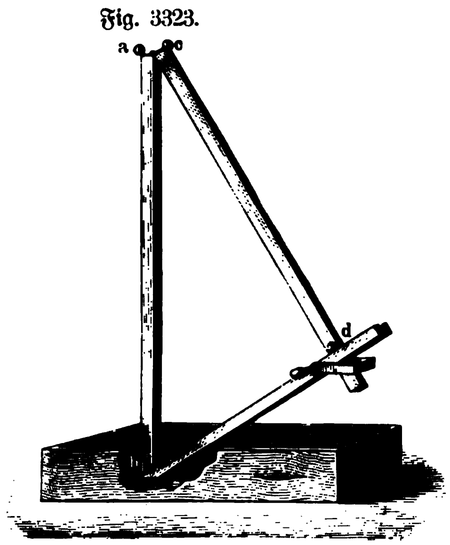
Um die Lehre vom Falle der Körper durch die Sehnen und Bogen oder den Durchmesser eines Kreises zu erläutern, kann man den Apparat Fig. 3321 und 3322

¹) Zu beziehen von Galen u. Terlinden in Rees am Niederrhein. Abbildung siehe Buch der Erfindungen, Leipzig 1900, Spamer, Bd. 6, 587.

anwenden. Er besteht aus einem hölzernen Ringe *AAA*, der innerhalb eine mit ausgeglättete Hohlkehle *aaa* hat; dieser Ring wird von einem kleinen Fuße auf einem Grundbrette mit Stellschrauben getragen, und der Fuß erweitert sich einerseits zu einem kleinen Schüsselchen für Sand. An seinem höchsten Punkte trägt der Ring diesem Schüsselchen gegenüber ein ähnliches aber ganz flaches, *b*, oder auch ein ebenes Brettchen mit einer Öffnung, deren Höhe und Weite der inneren Rinne *aaa* gleich ist. Seitwärts kann man an den Ring eine oder mehrere schiefe Ebenen, *mm*, *nn*, die gleichfalls mit Rinnen versehen sind, anschrauben.

Hat man nun eine der Sehnen *mm*, *nn* angeschraubt und hält eine Kugel mit der einen Hand in die Öffnung des oberen Schüsselchens und eine mit der anderen auf die Stelle der Sehne, welche der inneren Rinne entspricht, und läßt beide zugleich fallen, so werden sie auch nahezu gleichzeitig in dem Sande aufschlagen. Ebenso kann man eine Kugel auf einem kleineren oder größeren Kreisbogen und einer Sehne herabrollen lassen.

Fig. 3323.



Läßt man ein Brett nach einer Zykloide ausschneiden und mit einer Rinne versehen, so kann man auch die Eigenschaft derselben als Isochrone zeigen.

Einen neueren Apparat zu gleichem Zwecke zeigt Fig. 3323 (Lb, 20).

Eine in einer halbkreisförmigen[1]) Rinne hin- und herrollende Kugel verhält sich ähnlich wie ein gewöhnliches Pendel. Die Schwingungsdauer ist allerdings eine andere, da nur ein Teil der Energie in Form von fortschreitender Bewegung, der andere als Rotationsenergie auftritt. Einfacher und zweckmäßiger zwingt man aber den Körper die Kreisbahn zu durchlaufen, indem man ihn an einer Schnur aufhängt. Bei einem an der Decke aufgehängten Fadenpendel dieser Art von 5 bis 6 m Länge ist die Schwingungsdauer so groß, daß man sie bequem mittels einer Sekundenuhr oder eines Sekundenschlägers nachzählen kann.

Zunächst kann man auf die Erhaltung der Schwingungsebene hinweisen, welche sich ohne weiteres aus dem Trägheitsgesetz ergibt.

555. **Schwingungsebene.** Um zu erklären, wie aus der Erhaltung der Schwingungsebene die Achsendrehung der Erde abgeleitet werden kann, ist es am zweckmäßigsten, den Apparat, Fig. 3324, auf die Schwungmaschine zu setzen, das daran befindliche Pendel anzustoßen und dann die Maschine langsam zu drehen. Da die Kugel nur an einem dünnen Faden aufgehängt ist, so kann sich der Bügel öfter umdrehen, ehe dadurch die Kugel allmählich ihre ursprüngliche Schwingungsebene verläßt. Anstatt nur die Quadranten auf das Brettchen zu zeichnen, wie in der Figur, kann man ein Planiglob in Nordpolarprojektion auf dasselbe kleben, wodurch dann der folgende Versuch entbehrlich wird. Die vorläufige Anwendung

[1]) Ein Zykloidenpendel kann man darstellen durch eine entsprechend geformte Rinne, in welcher eine Kugel rollt.

uf die Achsendrehung der Erde kann man nun durch den kleinen Bügel, Fig. 3325, nachen, der sich mit seinen gabelförmigen Enden auf den Meridian eines Erdglobus ecken läßt, wodurch der Erfolg auf der Erde für Pol und Äquator erläutert erden kann. (Vgl. § 517, S. 1255.)

Zur Anstellung des Foucaultschen Versuchs [1]) selbst ist vor allem ein hoher ster Aufhängepunkt erforderlich; kann man über einen solchen von mindestens 6 m erfügen, so ist alles andere leicht zu beschaffen. Bei iedrigerem Aufhängepunkte dagegen gelingt zwar insoeit der Versuch auch, daß sich die Schwingungsebene s Pendels scheinbar von West über Nord nach Ost dreht; lein die Quantität der Drehung pro Stunde beträgt ald mehr, bald weniger als 15 $\sin \varphi$ (φ = geogr. reite, siehe Z. 16, 144, 1903).

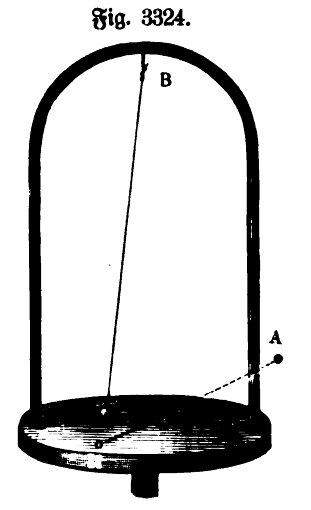


Fig. 3324.

Für $48^1/_2{}^0$ Breite ist der Sinus $^3/_4$. Während sich e Erde in einer Stunde um 15^0 dreht, beträgt in eser Breite die scheinbare Drehung der Schwingungsene nur $^3/_4 . 15$ oder $11^1/_4{}^0$.

Als Pendel dient eine Kanonenkugel von 6 bis) kg. Man läßt dieselbe auf Quecksilber schwimmen, obei man in einem passenden Gefäße nicht gerade viel uecksilber gebraucht; den obersten Punkt zeichnet man s Aufhängepunkt zuerst mit Kreide und dann mittels s Körners. Bei letzterer Gelegenheit wird man auch e Härte der Kugel kennen lernen; schlägt sich die Spitze s Körners stumpf, so ist es nicht möglich, die Kugel bearbeiten, und es hilft auch kein Ausglühen. Ist ies aber nicht der Fall, so läßt man die Kugel auf



Fig. 3327.

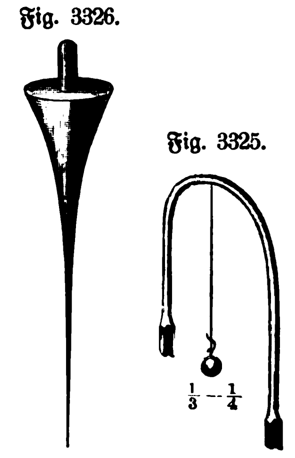


Fig. 3326. Fig. 3325.

er Drehbank genau rund laufen und so einspannen, daß die bezeichnete Stelle nau den Mittelpunkt bildet. Die Kugel wird nun mittels eines etwa 5 mm dicken ohrers ganz durchbohrt, um einerseits ein Holz, wie Fig. 3326, einstecken zu können, ährend die andere Seite weiter ausgebohrt und mit einem Gewinde versehen wird, n ein Stück Messing, wie Fig. 3327, einschrauben zu können, welches bereits von ten angebohrt ist und nun an der Kugel abgedreht und vorn mit einer kegelrmigen Vertiefung versehen wird, von wo aus das Stück vollends mit einem hrfeinen Bohrer durchbohrt wird. Steckt man einen feinen Stahl- oder Eisenaht — so fein, daß er eben noch die Kugel trägt — durch das kleine Loch und ndet ihn um ein Stückchen Messingdraht, welches zusammengebogen als Knopf für

[1]) Siehe auch L. Weinhold, Z. 17, 198, 1904.

den Eisendraht dient und sich ganz unterhalb des Messingstücks anspannt, so ist die untere Befestigung der Kugel fertig. Zum Aufhängen reicht jeder Haken aus, wenn man ihn mit einem gleich feinen Loche durchbohrt, den Draht durchzieht und um den Schaft des Hakens festbindet. Eine bessere Art des Aufhängens zeigen die Fig. 3328 und 3329, wo auf den Haken eine oben etwas kugelförmig ausgeschliffene, harte und polierte stählerne Pfanne aufgeschoben und der Draht durch eine feine Öffnung *a* des stählernen Bügels gezogen ist, welche mit der Schraube *b* in gerader Linie liegt; der Bügel selbst wird mittels der harten stählernen Spitze *b* auf die Pfanne gesetzt. Bei Fig. 3330 (Lb, 80) sind zwei zueinander senkrechte Schneiden benutzt.

M. Koppe (1888) empfiehlt folgende Aufhängemethode: Eine quadratische Bronzeplatte von etwa 4 cm Seite und 3 mm Dicke wird

Fig. 3330.



Fig. 3328.

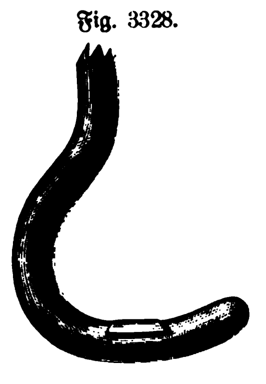
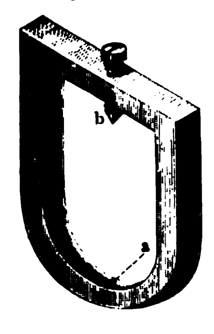


Fig. 3329.





in der Mitte mit einer feinen Durchbohrung versehen, die sich oben konisch erweitert. Durch diese geht der von der Pendelkugel kommende, 0,5 mm dicke Eisendraht hindurch, der oberhalb in eine Messingkugel von 1 cm Durchmesser eingelötet ist. An den vier Ecken ist die Platte durchbohrt, um sie von unten gegen einen an der Decke des Zimmers befindlichen Balken festzuschrauben, in dem sich eine Aushöhlung als Spielraum für die Messingkugel befindet. Es genügt ein Pendel von 3,7 m Länge und 5,5 kg Gewicht.

Bei dem Versuche läßt man zuerst die Kugel längere Zeit ruhig hängen, um den Draht auszuspannen und die drehenden Schwingungen aufhören zu machen, zu welchem Zwecke man die Kugel leise anhält, so lange sie sich noch weiter dreht.

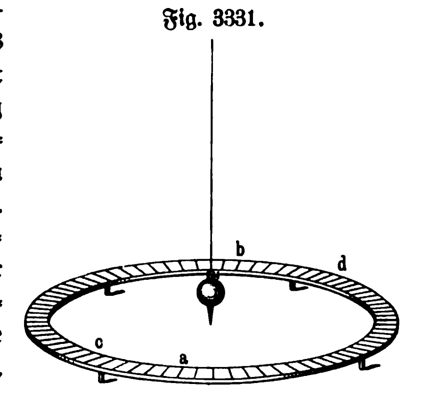
In der Richtung, in welcher das Pendel schwingen soll, wird ein Faden an einen Nagel gebunden und man beobachtet genau den Punkt der Kugel, welcher

mit dem Draht und diesem Nagel in einer Ebene liegt, und bezeichnet ihn mit Kreide. An den Faden macht man eine weite Schlinge, hängt diese um die Kugel so, daß die Ebene der Schlinge durch die Mitte derselben geht, und wickelt den Faden am Nagel so weit auf, als die Weite der Pendelschwingung betragen soll; diese nimmt man nur einige Decimeter groß. In der Schlinge wird nun die Kugel so gedreht, daß der bezeichnete Punkt mit dem Aufhängedraht und dem Faden wieder in einer Ebene liegt.

Man zeichnet ferner auf ein rundes Brett die Winkel auf, um die sich die Schwingungsebene des Pendels von Viertelstunde zu Viertelstunde drehen soll, bringt den Mittelpunkt dieses Brettes, noch ehe die Schlinge um die Kugel gelegt war, unter die Spitze (Fig. 3326) und dreht nachher das Brett um seinen Mittelpunkt so, daß der Durchmesser, von welchem aus die Winkel aufgetragen sind, ebenfalls in dieselbe Ebene kommt, welche der Aufhängedraht und der Faden miteinander machen (Fig. 3331).

Die Kugel muß nun vollkommen ruhig werden, wobei man durch sanftes Dagegenlehnen eines auf den Boden gestützten Stockes nachhilft und am besten etwa eine Stunde wartet, ehe man den Faden — außerhalb der Schlinge — abbrennt, um das Pendel in Bewegung zu setzen. Allerdings weicht nach kürzerer oder längerer Zeit die Bewegung des Pendels von der geraden Linie ab und beschreibt langgestreckte Ellipsen, was aber auf den eigentlichen Zweck des Versuchs nicht störend wirkt. Diese Abweichungen rühren zum Teil vom Luftzuge, zum Teil von der Unvollkommenheit der Aufhängevorrichtung, zum Teil von Unrichtigkeiten bei der Vorbereitung des Versuchs her; die letzteren üben einen um so größeren Einfluß aus, je kürzer das Pendel ist. (K, 30 bis 120[1]).

Fig. 3331.



Man kann auch auf zwei einander gegenüberstehende Stellen der Kreisteilung mittels einer Schablone prismatische Häufchen feuchten Sandes aufschichten, so daß sie von der am unteren Teil der Kugel befindlichen Spitze getroffen werden. Nach und nach wird der Ausschnitt, welchen die Spitze im Sand erzeugt, nach einer Seite hin immer breiter.

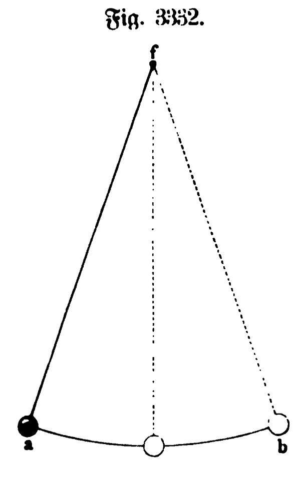
Adolf (Z. 8, 312, 1895) wirft den Schatten der Pendelspitze durch eine passend aufgestellte elektrische Lampe auf einen gegen 5 m entfernten Schirm und bringt dort eine Marke an, welche zunächst mit dem Schatten zusammenfällt. Schon nach wenigen Sekunden beobachtet man eine Abweichung des Schattens, deren Größe mit der berechneten übereinstimmt.

556. Schwingungsdauer[2]) und Amplitude. Ein langes einfaches Fadenpendel oder das Foucaultsche Pendel kann man auch dazu benutzen, um die Unabhängigkeit der Schwingungsdauer von der Amplitude zu prüfen[3]).

[1]) Über ein Foucaultsches Pendel mit Vorrichtung zur Objektivprojektion der Ablenkung mittels eines Spiegels siehe Th. Edelmann, Wied. Ann. 45, 187, 1892. Der Apparat ist zu beziehen von Dr. M. Th. Edelmann, Phys.-mech. Institut, München, zu 190 Mk. — [2]) Eine elementare Behandlung der Schwingungen gibt Fr. C. G. Müller in der Zeitschr. f. d. phys. u. chem. Unterricht 2, 115, 1889. — [3]) Über genaue Messung der Schwingungsdauer siehe F. Kohlrausch, Lehrbuch d. prakt. Physik, 9. Aufl., S. 105.

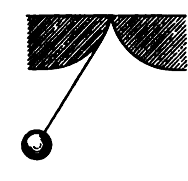
Die Bewegung von *a* bis *b*, Fig. 3332, heißt eine **halbe**, diejenige von *a* über *b* bis *a* eine **ganze Schwingung** oder **Oscillation**; die entsprechende Zeit eine halbe bezw. ganze **Schwingungsdauer**. **Elongation** oder **Ausschlag** ist die Entfernung von der Ruhelage, **Amplitude** der größte Ausschlag. Die **Schwingungszahl**, d. h. die Anzahl Schwingungen pro Sekunde ist das Reziproke der Schwingungsdauer.

Fig. 3332.

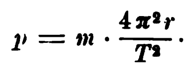


Genauer ist das Gesetz der Unabhängigkeit der Schwingungsdauer von der Amplitude erfüllt bei dem Cykloidenpendel, bei welchem sich die Schnur während der Schwingung an seitliche Führungskurven anlegt, von solcher Form, daß die Kugel statt einen Kreisbogen eine Cykloide durchläuft (Fig. 3333).

Fig. 3333.

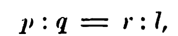


Zur Ableitung des Gesetzes für die Schwingungsdauer betrachtet man am einfachsten zunächst das **konische Pendel**, d. h. man gibt der Kugel, wenn sie am höchsten Punkte angelangt ist, einen Stoß senkrecht zur Schwingungsebene. Bei richtiger Stärke des Stoßes beschreibt dann die Kugel einen Kreis und die Umlaufsdauer ergibt sich ohne weiteres aus dem Gesetz der Zentrifugalkraft. Um den Umlauf eines Körpers in kreisförmiger Bahn zu erzwingen, ist nach § 510 (S. 1233) eine Kraft nötig, welche sich bestimmt durch die Formel



$$p = m \cdot \frac{4\pi^2 r}{T^2}.$$

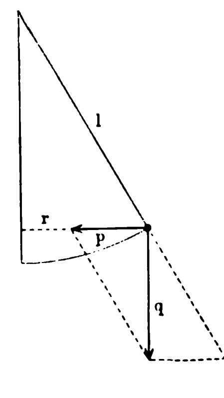
Hieraus ergibt sich die Umlaufszeit



$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m \, . \, r}{p}} \text{ Sekunden,}$$

wobei *r* den Radius der Bahn bedeutet und im Falle des Pendels *p* die Komponente der Schwerkraft, welche die Kugel nach dem Mittelpunkte hintreibt.

Fig. 3334.



Nennen wir *q* das Gewicht des Körpers und zerlegen dasselbe, wie aus der Fig. 3334 zu ersehen, in eine Komponente in der Richtung des Fadens, welche nicht zur Geltung kommen kann, da der Faden am Aufhängepunkte befestigt ist, und in die Kraft *p*, so ist

$$p : q = r : l,$$

somit

$$p = \frac{q \, . \, r}{l} = \frac{m \, . \, g \, . \, r}{l}$$

und

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m \, . \, r \, . \, l}{m \, . \, g \, . \, r}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \text{ Sekunden.}$$

Beispielsweise wird für $l = 4$ m, $T = 4$ Sekunden (rund).

Nach dem fundamentalen Gesetz, daß sich Bewegungen gegenseitig nicht stören, wird die anfänglich vorhandene Schwingungsbewegung durch den Stoß keine Änderung erfahren haben und ebenso wird sich die durch letztere veranlaßte Schwingung

so vollziehen, als ob das Pendel anfänglich in Ruhe gewesen wäre. Die Kreisbewegung muß somit die Resultante der beiden Schwingungen sein, ebenso wie z. B. die Wurfparabel die Resultante der horizontalen und der vertikalen Bewegung ist.

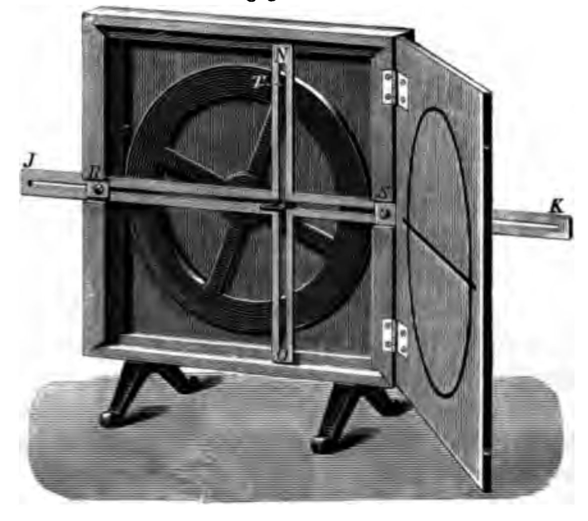
Somit ist auch die Schwingungsdauer einer solchen ebenen Schwingung

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \text{ Sekunden.}$$

Fig. 3335.

Fig. 3336.

Zur Demonstration der Zerlegung der Kreisbewegung in die ebenen Schwingungen kann man nach Fig. 3335 Schattenbilder des konischen Pendels auf zwei zu einander senkrechten Wänden etwa mittels zweier entfernter elektrischer Lampen entwerfen.


Fig. 3337.

Bergmann (1888) konstruierte einen Apparat, welcher unmittelbar zur Anschauung bringt, daß die Projektion eines in gleichförmiger Kreisbewegung befindlichen Punktes eine einfache hin und her gehende Bewegung ausführt. (Z. 1, 25, 1888.)

Die Vorderwand eines auf zwei Füßen C und D angebrachten flachen quadratischen Kastens (Fig. 3336 und 3337) ist kreisförmig ausgeschnitten und die Öffnung durch zwei nicht ganz anschließende halbkreisförmige, durch Bügel befestigte Segmente ausgefüllt, so daß ein kreisförmiger und ein gerader horizontaler Schlitz frei bleiben. Die Bügel sind groß genug, um zwei in den Schlitzen sich bewegenden Metallscheiben H und G den Durchgang zu gestatten, und der Träger von G ist, wie aus Fig. 3338 zu ersehen, so ausgeschnitten, daß der Träger T

mit der Scheibe H durch ihn hindurchgehen kann, wenn die beiden Scheiben auf ihrem Wege (bei 0° und 180°) zusammentreffen. Der Träger T ist ein Stift am Umfang eines Rades, wie Fig. 3338 zeigt, welcher in einen Schlitz des kreuzförmigen Rahmens $JNKO$ (Fig. 3337) eingreift, in dessen Mittelpunkt der Träger der Scheibe G befestigt ist. Das Rad kann durch eine Kurbel auf der Rückseite, welche in der Figur nicht sichtbar ist, umgedreht werden, wobei sich dann H im Kreise und G in der horizontalen Geraden bewegt, und zwar stets so, daß es die Projektion von H bildet.

Röntgen (1890) verwendet zur Demonstration des konischen Pendels eine hochpolierte, 220 g schwere, an einer 4 bis 2 m langen Schnur dicht über der Mitte des Experimentiertisches aufgehängte Stahlkugel, welche durch einen horizontalen Schlag mit einem kurzen dicken Holzstabe in etwa 1,5 m weite Schwingungen versetzt wird. Man kann leicht durch nochmaliges Anschlagen in einer zur Bewegung senkrechten Richtung elliptische oder zirkulare Schwingungen erzeugen und

Fig. 3338.

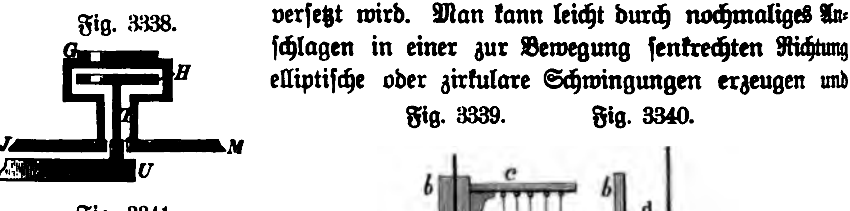
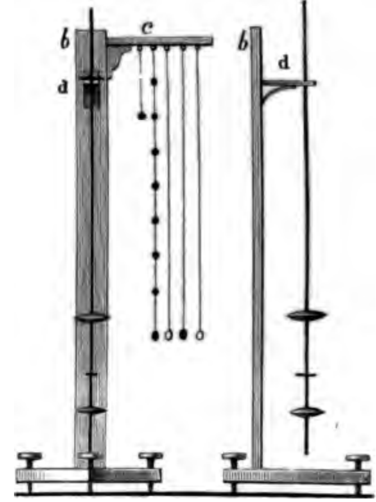


Fig. 3341.



Fig. 3339. Fig. 3340.



in letzterem Falle durch abermaliges Anschlagen in tangentialer Richtung die Zusammensetzung zweier zirkularen Schwingungen in eine geradlinige zeigen.

Aus der abgeleiteten Formel für das ebene Pendel folgt insbesondere auch, daß die Schwingungsdauer unabhängig ist vom Gewicht der Kugel und von der Natur ihrer Substanz, sodann, daß sie proportional ist der Quadratwurzel aus der Pendellänge.

Zum Nachweis dieser Gesetze ist der in Fig. 3339 und 3340 abgebildete Apparat sehr bequem. Seine Einrichtung ist folgende: Auf einem ziemlich starken dreieckigen Grundbrette mit Stellschrauben (oder auch nur mit drei Füßen) wird senkrecht das schmale Brett ab mit dem Querarme c befestigt. Letzterer trägt unterhalb einige kleine Häkchen, um eine Anzahl von einfachen Sekundenpendeln aus Blei, Stein, Kork, Wachs u. dergl., sowie ein solches zu halben Sekunden und ein solches, an dessen Faden von Stelle zu Stelle eine Bleikugel angebracht ist, aufzuhängen. Die Länge der einfachen Sekundenpendel wird vom unteren Teile des Häkchens an gemessen bis zum Mittelpunkte der Kugel, und man kann die er-

forderliche Länge sehr leicht dadurch genau erreichen, daß man den Seidenfaden zuerst etwas zu lang läßt und nun einige Knoten daran knüpft; auf gleiche Weise verfährt man mit dem viermal kürzeren Halbsekundenpendel.

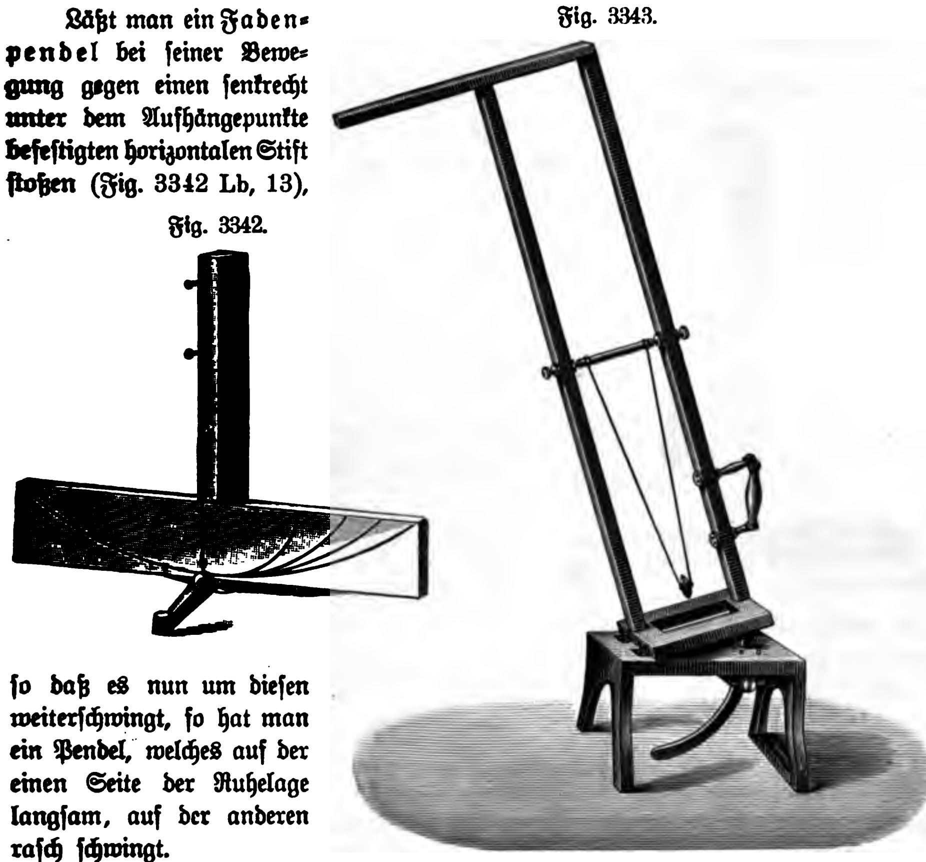
Zur Demonstration der Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Länge ist der Apparat Fig. 3341 (E, 7,50) bequemer.

Läßt man die Schnur eines Fadenpendels über eine Rolle an der Decke gehen und zieht es während der Schwingung in die Höhe, so werden die Schwingungen rascher, beim Ablassen wieder langsamer.

Läßt man ein Fadenpendel bei seiner Bewegung gegen einen senkrecht unter dem Aufhängepunkte befestigten horizontalen Stift stoßen (Fig. 3342 Lb, 13),

Fig. 3342.

Fig. 3343.



so daß es nun um diesen weiterschwingt, so hat man ein Pendel, welches auf der einen Seite der Ruhelage langsam, auf der anderen rasch schwingt.

Ersetzt man bei einem Pendel, wie Fig. 3343 (nach Mach), die Fäden durch steife Drähte, welche fest mit der Linse verbunden sind, und gibt dem Balken, an welchem das Pendel aufgehängt ist, eine Neigung β gegen den Horizont, so schwingt das Pendel langsamer, da nun nur die Komponente $g . \cos \beta$ der Schwerbeschleunigung zur Wirkung kommt. Für $\beta = 90$ wird diese Komponente $= 0$. Das Pendel kehrt nicht mehr in seine Gleichgewichtslage zurück, sondern rotiert kontinuierlich, bis durch Reibung seine Energie vernichtet ist [1]).

Oosting (Z. 8, 314, 1895) gibt dem schiefen Pendel die in Fig. 3344 dar-

[1]) Scheinbar bildet eine Art konisches Pendel auch eine Kugel, welche in einer kreisend bewegten runden flachen Schale an deren Umfang entlang läuft, oder ein Wagen auf kreisförmigem Geleise, doch ist hier die Umlaufsdauer keine bestimmte, sondern hängt von der Stärke des Anstoßes ab.

gestellte Form, bei welcher die leichte Beweglichkeit dadurch bedingt ist, daß es an zwei Spitzen oder Schneiden schwingt, von welchen die eine aufwärts, die andere abwärts gerichtet ist. Die Neigung wird dadurch hervorgebracht, daß man den Apparat auf eine schiefe Ebene setzt[1]). (Vgl. Horizontalpendel. S. 1310.)

557. Physikalisches Pendel. Ein einfaches physikalisches (materielles) Pendel bildet eine Schnur, an welcher in verschiedenen Abständen vom Aufhängepunkte mehrere Bleikugeln befestigt sind.

Ein gewichtsloser und unbiegsamer Faden, an welchem sich nur zwei materielle Punkte m und n befinden, würde schon ein materielles Pendel sein. Der schwere Punkt m, Fig. 3345, welcher dem Aufhängepunkte näher ist als n, würde für sich allein schneller schwingen als n; weil aber die beiden materiellen Punkte verbunden sind, so wird m die Bewegung von n beschleunigen, und umgekehrt wird n die Bewegung von m verzögern (erzwungene Schwingungen); die Schwingungen werden deshalb mit einer Geschwindigkeit vor sich gehen, welche zwischen den Geschwindigkeiten liegt, mit welchen jeder der Punkte m und n für sich allein schwingen würde. Die Schwingungsdauer des zusammengesetzten Pendels, Fig. 3345, ist gleich der eines einfachen, welches länger ist als fm und kürzer als fn. Ebenso verhält es sich mit jedem materiellen Pendel. Diejenigen Teile des Pendels nämlich, welche dem Aufhängungspunkte näher liegen, sind in ihrer Bewegung durch die entfernteren verzögert, die entfernteren aber durch die näheren beschleunigt. Es muß demnach auch für jedes zusammengesetzte Pendel einen Punkt geben, welcher durch die übrige Masse des Pendels weder beschleunigt noch verzögert ist, der also gerade so schnell schwingt wie ein einfaches Pendel, dessen Länge seiner Entfernung vom Aufhängepunkte gleich ist. Dieser Punkt heißt Schwingungspunkt, Centrum oscillationis[2]). Wenn man von der Länge eines zusammengesetzten Pendels spricht, so versteht man darunter die Entfernung dieses Punktes vom Aufhängepunkte oder, was dasselbe ist, die Länge eines einfachen Pendels von gleicher Schwingungsdauer.

Fig. 3344.

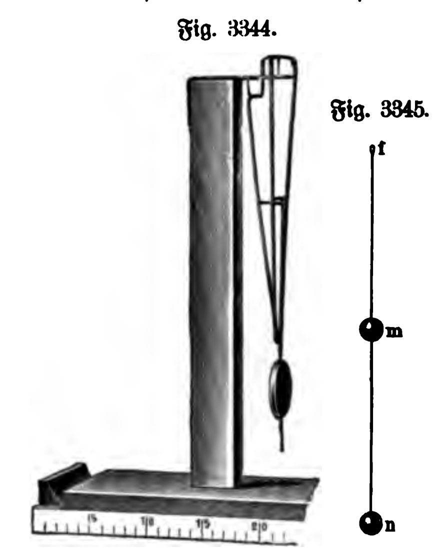


Fig. 3345.

Die Pendelformel kann, indem man Zähler und Nenner mit $m.l$ multipliziert und wieder $m.g = p$ setzt, geschrieben werden:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m\,l^2}{p\,.\,l}}.$$

$p.l$ ist das größte Drehungsmoment, welches auf das Pendel wirken kann, d. h. das Drehmoment, wenn das Pendel bis zu horizontaler Stellung abgelenkt ist, das sogen. Direktionsmoment[3]), $m.l^2$ das Trägheitsmoment.

[1]) Zu beziehen von dem Universitätsmechaniker F. Hajek in Prag. (Preis 20 fl.) — [2]) Über Demonstration eines Pendels mit meßbarer Pendellänge siehe Grimsehl, Ber. d. deutsch. phys. Ges. 2, 284, 1904. — [3]) Statt dieses Ausdrucks ist auch die Bezeichnung Direktionskraft gebräuchlich. Allgemein ist die Direktionskraft, das durch Ablenkung

Ganz ähnliche Form nimmt die Formel für die Schwingungsdauer beim zusammengesetzten Pendel an. Es bedeute l die Länge des äquivalenten einfachen Pendels, ε die Winkelbeschleunigung, wenn dasselbe bis zu 90° gegen die Vertikale abgelenkt ist, so daß $g = l \,.\, \varepsilon$, dann wird

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{l \,.\, \varepsilon}} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{\varepsilon}}\,.$$

oder, wenn man für ε den oben S. 1266 berechneten Wert setzt:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma \mu \varrho^2}{\Sigma p \,.\, r}},$$

wenn $\Sigma \mu \varrho^2$ das Trägheitsmoment und $\Sigma p \,.\, r$ die Summe der größtmöglichen Werte der Drehungsmomente, d. h. die Direktionskraft. Demnach ist die Dauer einer ganzen Schwingung gleich 2πmal der Wurzel aus dem Quotienten des „Trägheitsmomentes“ und dem „Direktionsmoment“.

Beispielsweise war eine Schnur belastet mit gleichgroßen Bleikugeln in den Abständen 1, 2,45, 3,94, 5,48 m vom Aufhängepunkt. Es folgt, wenn man $p = \mu \,.\, g$ setzt und den Bruch mit μ kürzt:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1 + 2{,}45^2 + 3{,}94^2 + 5{,}48^2}{g \,.\, (1 + 2{,}45 + 3{,}94 + 5{,}48)}} = 3{,}9 \text{ Sekunden.}$$

Für das aus mehreren Bleikugeln zusammengesetzte Pendel (Fig. 3339) schraubt man in jede Kugel zwei Häkchen diametral gegenüber. Setzt man einen glatten mit Asphalt bestrichenen Eisendraht in den Kugelmodel, so kann man denselben nach dem Gusse ausziehen und sich das Bohren der Löcher sparen, was in Blei nicht zu verachten ist, namentlich bei kleinen Löchern. Dieses Pendel dient zur Erläuterung des Unterschiedes zwischen dem physischen und mathematischen Pendel, indem man es zugleich mit einem solchen schwingen läßt.

558. **Die korrespondierende Pendellänge.** Nennt man l die Entfernung des Schwerpunkts vom Aufhängepunkt und p das Gesamtgewicht des Pendels, so ist

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma \mu \varrho^2}{p \,.\, l}} = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma \mu \varrho^2}{g \,.\, m \,.\, l}}\,.$$

Ein einfaches Pendel von der Länge L hat die gleiche Schwingungsdauer, wenn $2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$ gleich dem obigen Wert von T ist, d. h. wenn

$$L = \frac{\Sigma \mu \varrho^2}{m \,.\, l}\,.$$

Um $\Sigma \mu \varrho^2$ leicht bestimmen zu können, benutzt man Pendel mit mehreren verschiebbaren Linsen. Zum Aufhängen solcher befindet sich an dem Gestelle, Fig. 3339, das eiserne Stück d, welches in Fig. 3346 und 3347 in größerem Maßstabe abgebildet ist. Auf der Platte b ist der Träger ca festgenietet und die Platte selbst wird in das Holz des Gestelles eingelassen und durch sechs Schrauben gut befestigt; das gabelförmige Ende aa des Trägers hat auf seinen Armen nahe am Ende

eines drehbaren, aber durch eine Kraft (Elastizität, Erdmagnetismus) an freier Drehung behinderten Körpers um einen kleinen Winkel geweckte Drehmoment. Sie ist 1 CGS, wenn Drehung um den Winkel 1 CGS (57,3°) das Drehmoment 1 CGS hervorruft.

halbcylinderförmige Vertiefungen, die man zuerst mit der Feile möglichst gut ausarbeitet und dann auf einem abgedrehten hölzernen Stäbchen von entsprechender Dicke mit Schmirgel auf der Drehbank ausschleift; sie dienen als Zapfenlager für das eiserne Stück *dd*, welches in Fig. 3348 nochmals größer in der Ansicht von vorn abgebildet ist. Dieses Stück ist aus dem Ganzen geschmiedet und die Zapfen *ee* werden abgedreht. Auf die beiden langen Seiten von *dd* werden zwei Stücke Gußstahl von der Form wie *f* in Fig. 3348 eingeschoben, welche glashart sind und deren Cylinderflächen poliert wurden; auf ihnen sollen die Schneiden der Pendelstangen ruhen. Diese beiden Stücke kann man so verfertigen, daß man zwei Stückchen Gußstahl aufeinander legt, sie mit dem Feilkloben zusammenschraubt und dann durchbohrt, wobei jedes die halbe Bohrung erhält; nach dem Bohren schleift man sie ebenfalls beide zugleich mit einem abgedrehten Messingstücke und Schmirgel fein

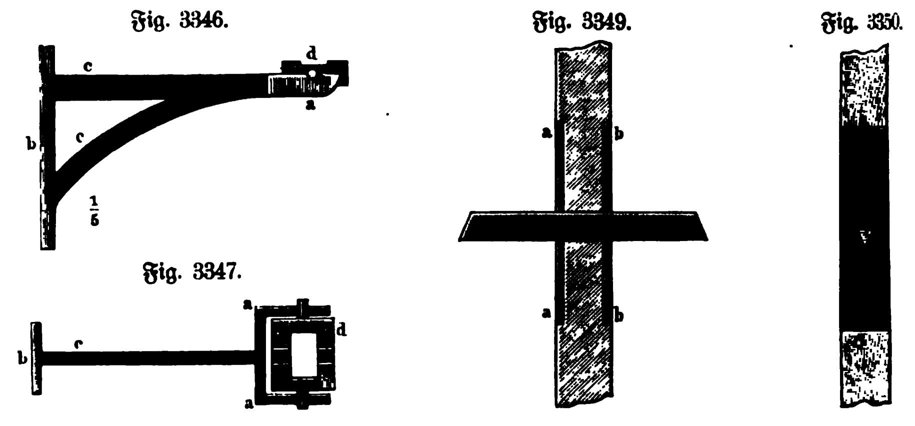


Fig. 3346. Fig. 3347. Fig. 3349. Fig. 3350.



Fig. 3348.

aus, feilt sie in die erforderliche Form und härtet sie. Später werden dieselben auf Holz mit feinem Schmirgel nochmals geschliffen und ebenfalls auf Holz mit Englischrot poliert. Da auf diese Weise das Pendel frei beweglich ist und stets sogleich eine senkrechte Lage annehmen kann, also das Gestell nie mittels Stellschrauben mühsam senkrecht aufgestellt zu werden braucht, so erspart man sich dadurch viele unnütze Mühe.

Die Schneiden werden aus einem Stückchen Gußstahl mit der Feile möglichst fein zugerichtet und gehärtet, darauf aber mit Schmirgel auf einer Glasplatte abgeschliffen, um ihnen eine gerade Schneide zu geben. Zuletzt poliert man dieselben auf der Polierscheibe mit Englischrot.

Die Pendelstangen bestehen aus hölzernen Stäben von Nußbaum oder Apfelbaum von 1 qcm Querschnitt. An der Stelle, wo die Schneiden hinkommen, werden von beiden Seiten Messingplatten *aa*, *bb*, Fig. 3349 und 3350, eingelassen, welche vorher mit genau zur Schneide passenden Öffnungen versehen sind und mit ein paar durchgehenden Messingstiften vernietet werden; das Holz wird erst nachher für die Schneide durchgearbeitet, und die Schneide durch einige leichte Schläge mit einem hölzernen Hammer eingetrieben. Eine Pendelstange erhält eine solche Schneide in der Mitte für die Versuche über das Trägheitsmoment.

Die Linsen gießt man aus Blei in hölzernen Formen, die man mit Graphit ausgestrichen hat. Durch die Formen steckt man ein eben gefeiltes, nach einer Seite hin schwach verjüngtes Eisen von einem rechteckigen Querschnitte, wie Fig. 3351,

dessen schmale Seite 1 cm breit ist; auf die Endflächen werden für das spätere Abdrehen Punkte *a* eingeschlagen, aber nicht in die Mitte der Flächen, sondern um die halbe schmale Seite von dieser entfernt. Dieses Eisen wird so in die Gießform gesteckt, daß die Punkte nahezu der Mitte der Linse entsprechen und also die Öffnung in der Linse exzentrisch wird. An diesem Eisen werden die Linsen nachher abgedreht, bis sie das erforderliche Gewicht haben, wobei man natürlich das Eisen tariert, sowie das Messingstück *b*, Fig. 3352 und 3353. Letzteres wird beim Anstecken an die Stange zuerst eingelegt und füllt den von der Stange übrig gelassenen Raum der Öffnung aus; es wird durch eine Schraube *a* gegen die Stange gedrückt und befestigt die Linse an diese. Sein scharfes Ende muß eine ganze Anzahl Centimeter von der Mitte der Linse entfernt sein.

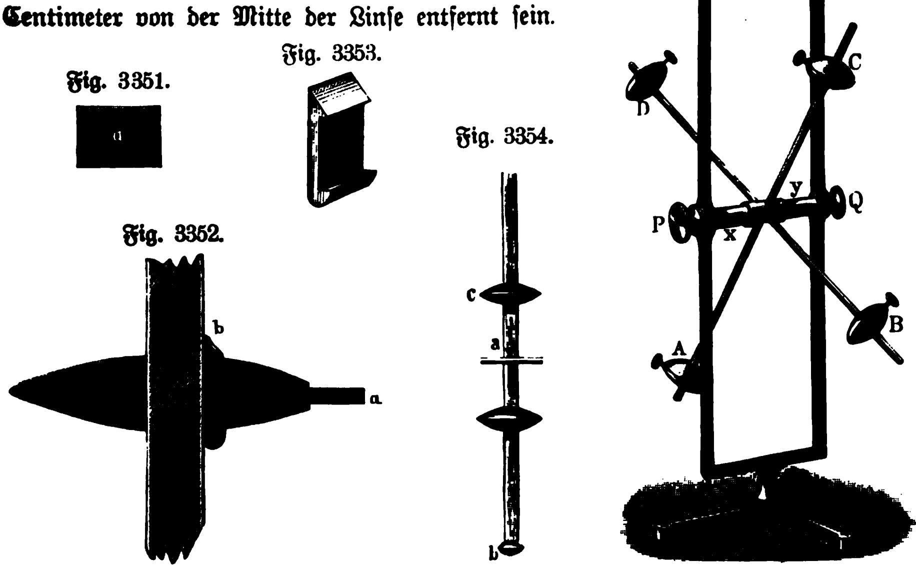


Fig. 3351. Fig. 3352. Fig. 3353. Fig. 3354. Fig. 3355.

Zu den Versuchen über das Trägheitsmoment bedarf man außer einer kleinen Linse von etwa 125 bis 250 g zwei andere von je 1 kg und zwei zu je 250 g. Um den Versuch anzustellen, befestigt man die schweren Linsen gleich weit vom Aufhängepunkte und die ungerade kleinere an das Ende der Stange, wie Fig. 3354, und beobachtet die Schwingungszeit des Pendels, d. h. wie viel Schwingungen es in der Minute macht. Diese Schwingungszeit bleibt dann unverändert, wenn man die viermal leichteren Linsen in der zweifachen Entfernung vom Unterstützungspunkte anbringt.

Das **Kreuzpendel** von Oberbeck (1888) (Fig. 3355) besteht aus vier in Form eines Kreuzes auf der Achse xy befestigten Pendeln $ABCD$ (je 140 g schwer). Man bringt zunächst nur A an. Die Schwingungsdauer ist klein. Werden nun auch B und D hinzugefügt, so bleibt die treibende Kraft unverändert, dagegen vergrößert sich das Trägheitsmoment und demgemäß die Schwingungsdauer. Befestigt man C in derselben Entfernung entweder an die obere oder untere Stange, so wird im ersten Fall das Drehungsmoment kleiner, im zweiten größer, das Trägheitsmoment ist dagegen in beiden Fällen das gleiche.

559. Sekundenpendel. Aus der gemessenen Schwingungsdauer und der Länge eines Pendels ergibt sich die Fallbeschleunigung, da

$$g = \frac{4\,\pi^2 . l}{T^2} \text{ Sekunden.}$$

Umgekehrt kann man, falls g bekannt ist, die Länge des Sekundenpendels ermitteln, d. h. eines Pendels, dessen halbe Schwingungsdauer eine Sekunde ist, da $T = 2$, also: $l = \frac{g}{\pi^2}$ Meter.

Für $g = 9{,}81$ (Karlsruhe) ergibt sich $l = 0{,}994$ m.

Setzt man g für 45° Breite $= 9{,}8062$, so ist l für

0°	20°	40°	60°	80°	90°
0,991	0,9915	0,9931	0,9949	0,9960	0,9962.

Die geographische Breite beträgt für Aachen 50,78, Basel 47,56, Berlin 52,50, Dresden 51,04, Freiburg i./B. 48,00, Hamburg 53,55, Heidelberg 49,41, Karlsruhe 49,01, Königsberg 54,71, Leipzig 51,34, Madrid 40,41, München 48,15, Paris 48,83, Petersburg 59,94, Rom 41,90, Wien 48,23. Ist die Länge eines Pendels nahezu 1 m, also die Schwingungsdauer nahezu eine Sekunde, so bestimmt man letztere am genauesten durch die Methode der Koinzidenzen. Liegen nämlich zwischen zwei aufeinanderfolgenden Koinzidenzen der Pendelschwingung mit einem Sekundenschlag n Sekunden, so ist $T = \frac{n}{n \mp 1}$, wobei das obere und das untere Zeichen gilt, je nachdem das Pendel hinter der Uhr zurückbleibt oder ihr voraus eilt.

Ebenso läßt sich die Schwingungsdauer zweier Pendel vergleichen. Wartet man, bis beide wieder in derselben Richtung gleichzeitig durch die Ruhelage gehen, wie zu Anfang, so ist $T_1/T = n/n \pm 2$.

Wartet man die $m$te Koinzidenz ab und sind bis dahin N Schwingungen des ersten Pendels erfolgt, so ist $T_1/T = N/N \pm 2m$. Ist das erste Pendel ein Sekundenpendel ($T = 2$), so erhält man für die Schwingungsdauer des zweiten $T_1 = \frac{2n}{n \pm 2}$ bezw. $\frac{2N}{N \pm 2m}$ Sekunden[1]).

560. **Reversionspendel.** Eine der Pendelstangen (S. 1306) erhält zwei Schneiden (Fig. 3356) in der Entfernung des einfachen Sekundenpendels $= 104$ cm. Wird die Entfernung der beiden Schneiden allgemein $= l$ gesetzt, die Entfernung eines Massenteilchens m von der oberen Schneide, an welcher das Pendel aufgehängt wird, $= r$, somit von der unteren $l - r$, so ist die reduzierte Länge $L = \frac{\Sigma m r^2}{\Sigma m r}$ und, falls das Pendel umgekehrt und an der früheren unteren Schneide aufgehängt wird, $L_1 = \Sigma m (l - r)^2 : \Sigma m (l - r)$. Reguliert man nun die Belastung so, daß die Schwingungsdauer in beiden Fällen gleich (= eine Sekunde) ist, also auch $L = L_1$, so muß sein:

$$\frac{l^2 \Sigma m - 2\,l \Sigma m r + \Sigma m r^2}{\Sigma m l - \Sigma m r} = \frac{\Sigma m r^2}{\Sigma m r}.$$

---

[1]) Gewöhnlich wird als Schwingungsdauer eines Pendels nicht die Dauer einer ganzen, sondern einer halben Schwingung bezeichnet. Genauere Anweisung zur Bestimmung von g im Unterricht nach der Methode der Koinzidenzen gibt P. Johannesson, Z. 12, 6, 1899.

Diese Gleichung ist richtig, wenn $l = \Sigma mr^2 : \Sigma mr$, d. h. wenn $L = l$. Die Entfernung der beiden Schneiden ist also in diesem Falle gleich der reduzierten Länge (der Länge des einfachen Sekundenpendels).

Um den Versuch mit dem Reversionspendel zu machen, befestigt man zwei gleich schwere Linsen so an den Stab mit zwei Schneiden, daß die Mitte der einen 80, die der anderen 120 cm von der einen Schneide entfernt ist; dann wird die Schwingungszeit auf beiden Schneiden sehr nahe gleich sein. (Fig. 3356.)

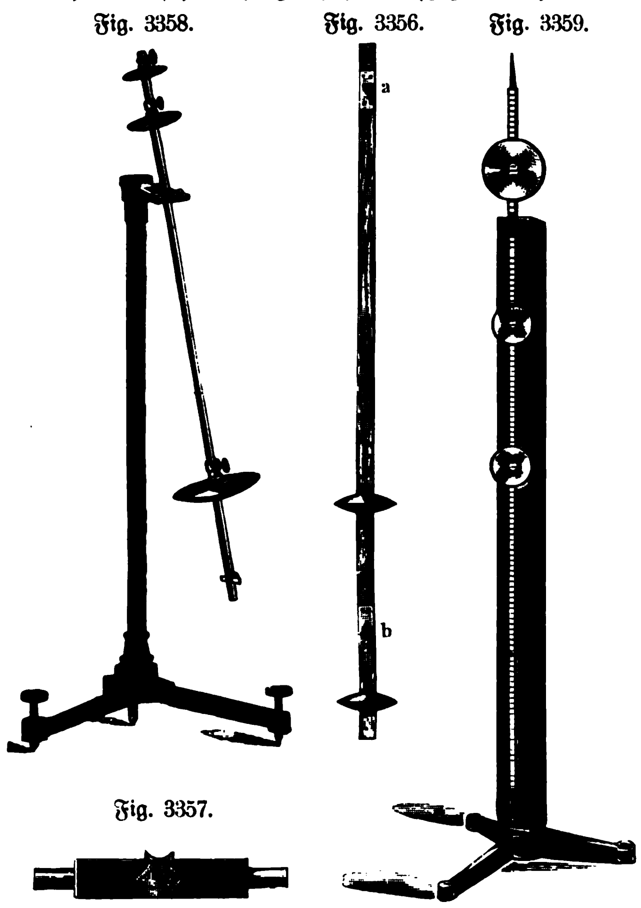


Fig. 3358. Fig. 3356. Fig. 3359. Fig. 3357.

Hat man die Punkte für das Reversionspendel gefunden, an welchem die Linsen befestigt werden müssen, so bezeichnet man dieselben. Das Gewicht der Linsen stempelt man auf sie selbst.

Da es unbequem ist, bei den Versuchen mit dem Reversionspendel beim Umkehren eine der Linsen entfernen zu müssen, so kann man auch in dem Stücke *dd*, Fig. 3348, die eine Langseite, wie in Fig. 3357, ganz durchbrechen, um die Pendelstange herausnehmen zu können; es erfordert dieses aber eine etwas größere Stärke des Apparates und sehr sorgfältige Arbeit. Die Fig. 3358 (L, 28) und 3359 (Lb, 71) stellen andere Ausführungsformen dar.

Pendel für relative Schweremessungen durch Beobachtung der Koinzidenzen, zur Bestimmung des Verhältnisses der Fallbeschleunigung an zwei verschiedenen Orten hat v. Sterneck beschrieben (Zeitschr. f. Instrumentenkunde 8, 157, 1888 [1]).

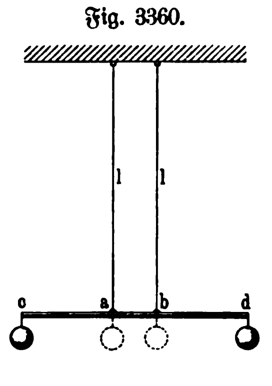
561. Verschiedene Pendel. Pendel ungewöhnlicher Art sind eine bifilar- oder eine kontrafilar aufgehängte Stange und eine horizontale Scheibe, welche an zwei diametral entgegengesetzten Punkten durch über Rollen geführte und mit gleichen Gewichten belastete Schnüre gezogen oder trifilar aufgehängt wird.

[1]) Pendelapparate für relative Schweremessungen liefern: Carl Bamberg, Werkstätte f. Mechanik u. Optik, Friedenau-Berlin, Kaiserallee 39/41; P. Stückrath, Werkstätte f. wissenschaftl. Instrumente, Friedenau-Berlin, Albestr. 11 u. a. S. a. Haid, Zeitschr. f. Instrum. 16, 194, 1896 und Koch, Ann. d. Phys. 15, 146, 1904.

In allen Fällen läßt sich leicht die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von dem Trägheitsmoment durch Anhängen oder Auflegen schwerer Massen zeigen.

Das Prinzip des **Bifilarpendels** ist in Fig. 3360 dargestellt. An den Enden der gewichtslosen Stange cd seien zwei gleichschwere Massen M angehängt. Wird die Stange gedreht, so steigt sie in die Höhe, sinkt dann wieder zurück u. s. w.

Fig. 3360.



Das Direktionsmoment ist dasselbe, als ob die beiden Massen in der punktierten Stellung bei a und b angebracht wären. Dann hat man zwei miteinander verbundene einfache Pendel, die ebenso schwingen, wie wenn sie nicht verbunden wären, d. h. mit der Schwingungsdauer $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{M.\varrho^2}{x}}$, wenn ϱ die Hälfte der Strecke ab und x das unbekannte Direktionsmoment bedeuten. Somit ist $x = \frac{g.M.\varrho^2}{l}$ und die Schwingungsdauer des Bifilarpendels, wenn die Hälfte von $cd = r$ gesetzt wird:

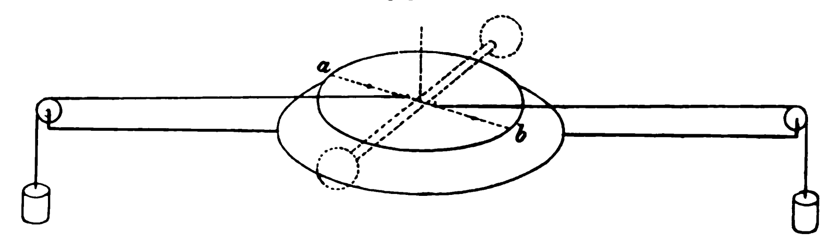
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{M.r^2.l}{g.M.\varrho^2}} = 2\pi\frac{r}{\varrho}\sqrt{\frac{l}{g}} \text{ Sekunden.}$$

Beispielsweise war $l = 4{,}3$ m, $r = 0{,}6$, $\varrho = 0{,}32$, daraus folgt: $T = 8$ Sekunden.

Das **Kontrafilar-** oder **Horizontalpendel**[1]) dient nur zur Messung besonders kleiner Direktionskräfte. Es wird durch die Fäden (siehe Fig. 2215, S. 720) genötigt, sich auf einer konischen Fläche zu bewegen, so daß die angehängte Masse auf- und absteigt. Hierdurch ergibt sich ein sehr geringes Direktionsmoment, welches eine bestimmte Schwingungsdauer bedingt[2]).

Bei **Töplers** Apparat (S. 1273) wird die schwingende Drehbewegung einer Scheibe durch die Anordnung Fig. 3361 erläutert. Gleichgewicht ist vorhanden, wenn

Fig. 3361.



der Durchmesser ab mit der Richtung der beiden Fäden zusammenfällt. Wird die Scheibe aus dieser Lage gedreht, so führt sie pendelnde Schwingungen wie eine Magnetnadel aus. Man kann sehen, daß die Schwingungsdauer bei abnehmender Größe der Amplituden konstant bleibt, ferner, daß bei Änderung des Drehmomentes sich die Schwingungsdauern umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus dem Dreh-

[1]) **Zöllner**, Pogg. Ann. 150, 134, 1873. — [2]) Dies ist auch der Fall bei den neueren zur Beobachtung von Erderschütterungen dienenden, **Horizontalpendel** genannten Apparaten (Fig. 3171, S. 1223), deren Prinzip auch an einem Tür- oder Fensterflügel erklärt werden kann. (Vergl. **Rebeur-Paschwitz**, Astronom. Nachr. 1892, 193.) Solche Horizontalpendel (**Seismometer**) liefern: J. und A. **Bosch**, Mechaniker u. Optiker, Straßburg i. E., Münsterstr. 15.

momente verhalten, endlich daß sie sich direkt wie die Quadratwurzeln aus den Trägheitsmomenten verhalten, indem man einen an den Enden mit Gewichten belasteten Stab auf der Scheibe befestigt, welche das dreifache Trägheitsmoment der Scheibe besitzt.

Bei einer ähnlichen einfacheren Vorrichtung waren die beiden Gewichte je 7 kg, ihr Abstand von der Drehachse 0,25 m, das Drehmoment wurde erzeugt durch zwei Gewichte von je 4 kg, welche an Fäden ziehen, die im Abstand von je 0,31 m von der Achse befestigt waren. Es folgt

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{2.7.0{,}25^2}{9{,}81.8.31}} = 1{,}18 \text{ Sekunden.}$$

562. Energie der Pendelschwingungen. Dieselbe ist in jedem Momente gleich der potentiellen Energie der Pendellinse in ihrer höchsten Lage. Ist die Höhe s, das Gewicht der Linse p, so beträgt die Energie $p.s$ Kilogrammeter. Da nun, wenn d die von der Pendellinse bis zum Ruhepunkte durchlaufene Sehne bedeutet und l die Länge des Pendels, $d:s = 2l:d$, so ist die Energie $= p \cdot \frac{d^2}{2l}$ d. h. proportional zum Quadrate der Amplitude.

563. Dämpfung. Im allgemeinen sind die Schwingungen gedämpft, d. h. die Energie wird fortwährend durch Reibungswiderstände vermindert. Bei einer Schaukel beispielsweise muß, um sie in Gang zu erhalten, fortwährend Arbeit geleistet werden, ebenso bei einer Pendeluhr. Ist die Reibung so beträchtlich, daß das Pendel nur eben bis zur Ruhelage kommt, so nennt man die Bewegung aperiodisch. Damit dieser Zustand eintrete, ist nötig, daß die Quadratwurzel aus dem Produkt von Trägheitsmoment und Direktionsmoment kleiner sei als die Hälfte des Dämpfungsmomentes, d. h. des Faktors, mit welchem die jeweilige Winkelgeschwindigkeit das der Bewegung widerstehende Drehmoment ergibt. Ist u_0 die Winkelgeschwindigkeit bei dem Durchgang durch die Ruhelage, α der Ausschlag, welcher ohne Dämpfung darauf erfolgen würde, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \ldots$ die Ausschläge, welche mit Dämpfung erfolgen, so heißt $k = \alpha_1 : \alpha_2 = \alpha_2 : \alpha_3 = \ldots u_0 : u_1 = u_1 : u_2 \ldots$ das Dämpfungsverhältnis, $\log k$ das briggische logarithmische Dekrement und $\log nat\, k = 2{,}3026 . \log k$ das natürliche logarithmische Dekrement¹).

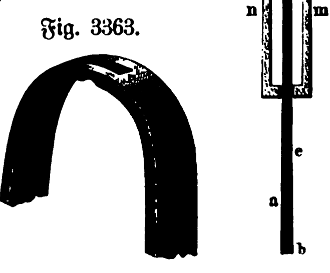


Fig. 3362.

Fig. 3363.

564. Pendeluhren. Ein auf die oben angegebene Art gefertigtes Sekundenpendel geht eine Stunde und länger; allein es gibt die Schläge nicht hörbar an, und ist daher für viele Zwecke unbequem. Will man ein Pendel haben, welches die Sekunden hörbar angibt, so befestigt man an der Stange desselben auf der oberen Seite eine eiserne Zwinge a (Fig. 3362), in welche die eiserne Zunge bc gelötet ist. Durch diese Zunge geht bei e die Achse und nahe beim oberen Ende c ein runder Stift, auf welchen der umgebogene Doppelhammer durch einen

¹) Weiteres über gedämpfte Schwingungen siehe F. Kohlrausch, a. a. O., S. 448 u. ff.

Schlitz *r* (Fig. 3363) gehängt wird (Fig. 3364 K, 40.) Dieser gibt nun die einzelnen Schläge des Pendels hörbar an. Zählen muß man sie freilich selbst. Diese Arbeit wird erspart durch Anwendung eines Zählwerks.

Fig. 3364.

Ein einfaches Pendeluhrmodell nach Angaben Galileis[1]) (Fig. 3365) kann man

Fig. 3365.

Fig. 3366.



(ohne Räder) in großem Maßstabe aus Zinkblech und Bandeisen leicht selbst herstellen.

Ein sehr primitives Modell einer gewöhnlichen Uhr nach Fig. 3366 kann man sich ebenfalls leicht selbst herstellen, wenn man von einem Uhrmacher ein Steigrad von 30 Zähnen, das zugleich Schnurrad ist, machen läßt, welches durch einen großen Anker die Bewegung des Pendels auf gewöhnliche Weise unterhält, und wobei der auf die Achse des Rades befestigte Zeiger auf dem durchbrochenen Zifferblatte unmittelbar die Sekunden zeigt.

Das Uhrwerk wird auf eine Säule gestellt, hinter welcher das Gewicht heruntergeht und das Pendel hängt. Die Säule darf nur die Höhe von etwa 120 bis 150 cm haben, damit man bequem die Bewegung des Ankers sehen kann. Um dennoch einen längeren Gang zu erzielen, macht man das auf der Achse des Steigrades be=

[1]) Müller=Pfaundler, Lehrb. d. Physik I, S. 322.



Fig. 3367.

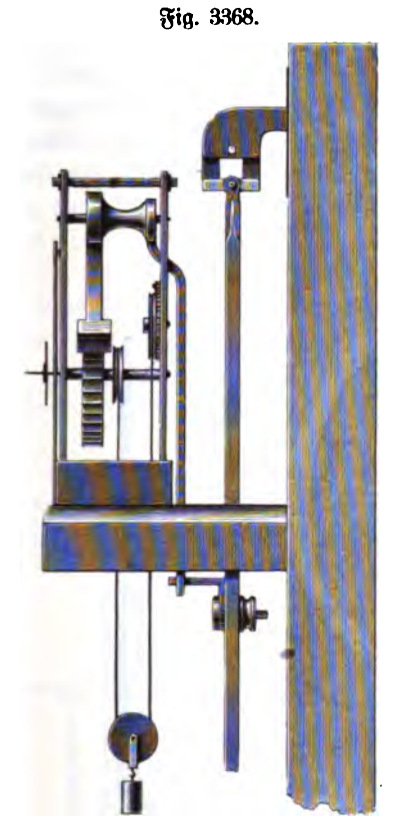


Fig. 3368.



Fig. 3369.

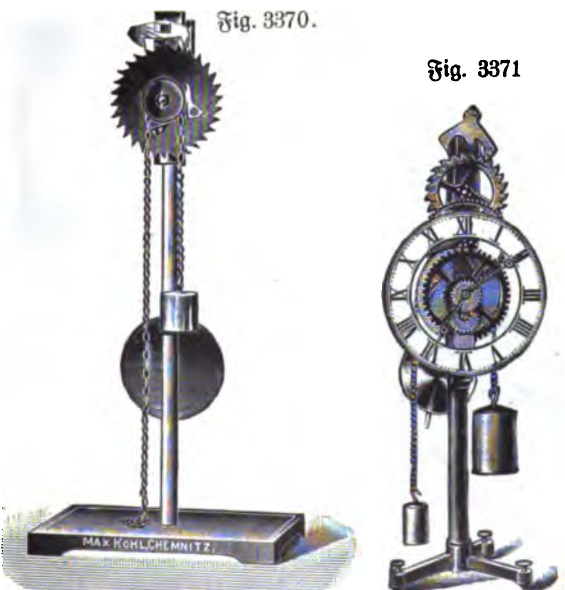


Fig. 3370. Fig. 3371

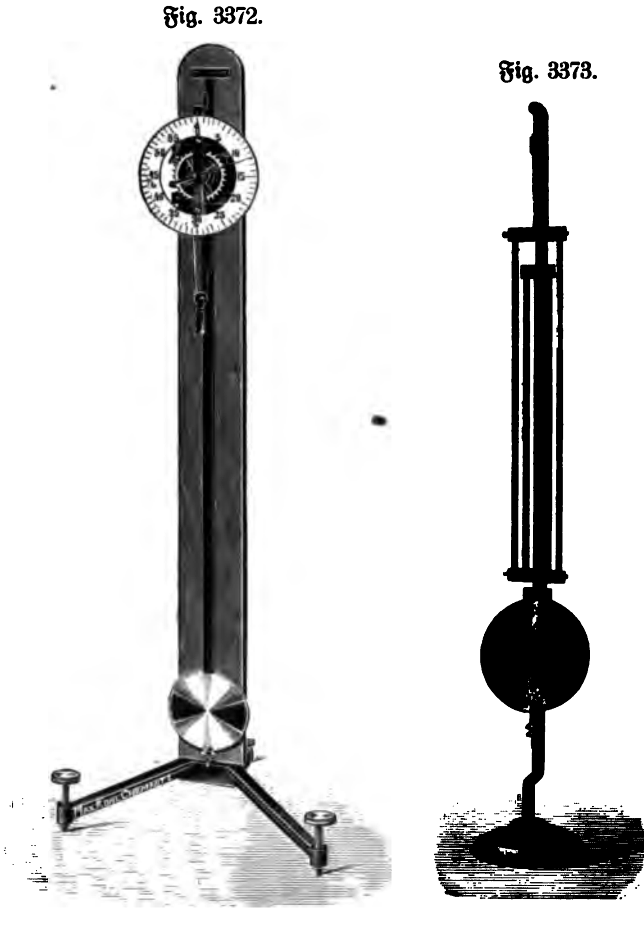
...tigte Schnurrad etwas klein ...d hängt das ohnehin nur ...bedeutende Gewicht an einer ...weglichen Rolle auf.

Für den Fall, daß man ...ehr auf einen solchen Apparat ...rwenden wollte, könnte er auf ...e in den Fig. 3367 und 3368 ...$^1/_4$ bis $^1/_3$ der natürlichen ...röße abgebildete Art herge- ...ellt werden. Da die Schnur ...ne Ende über ein zweites, an ...r hinteren Platine befind- ...hes, mit dem Gesperre ver- ...henes Schnurrad läuft, so ...nn man immer wieder auf- ...hen, ohne den Gang zu ...terbrechen, was für viele ...ecke sehr angenehm ist. Die ...nse kann man aus Eisen gießen lassen, wodurch man leicht zu einem ansehnlichen ...wichte kommt; unter 5 kg sollte man aber nicht nehmen.

Vollkommenere Modelle sind dargestellt in den Fig. 3369, 3370 (K, 19), 3371 (Lb, 50) und 3372 (K, 85)[1].

Recht nützlich ist auch ein Metronom (Fig 2037, S. 650, E, 12), dessen innere Einrichtung sehr einfach ist und nach Entfernung der Bodenplatte leicht demonstriert werden kann. Es hat den besonderen Vorzug, daß die Pendellänge durch Verschieben des Gewichtes sich leicht ändern läßt und die Schläge auch auf weite Entfernung deutlich hörbar sind.

Fig. 3372. Fig. 3373.



Wollte man zur Demonstration ein Rostpendel (Fig. 3373 E, 45) aus Eisen und Zink verfertigen, so müßten die Zinkstangen $^7/_{11}$ oder nach anderen 0,75 der Pendellänge vom Aufhängepunkte bis zum Mittelpunkte der Linsen haben, wobei also ein Paar Zinkstangen ausreicht. Die Stangen könnten mit Ausnahme der mittleren, welche die Linse trägt und welche mit einer Schraube in das letzte obere Querstück eingelassen sein muß, alle in den Querstücken vernietet werden.

565. Kettenpendel. Nennt man p das Gewicht der Pendellinie, l die Pendellänge und d die Elongation, so ist die Kraft, welche die Pendellinse zur Ruhelage zurücktreibt: $k = p.d/l = f.d$, wenn man mit f die dem Ausschlag 1 entsprechende Kraft bezeichnet. Die Schwingungsdauer ist dann:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\Sigma m r^2}{p.l}} = 2\pi\sqrt{\frac{\Sigma m r^2}{f l^2}} = 2\pi\sqrt{\frac{m l^2}{f l^2}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{f}} \text{ Sekunden.}$$

---

[1]) A. Heinemann u. Co., Berlin SW., Charlottenstr. 18, liefern eine Lehruhr für Kinder zum selbständigen Zusammensetzen zu 3,50 Mk., desgleichen die Leipziger Lehrmittelanstalt (Dr. O. Schneider), Leipzig, Windmühlenstr. 39. Präzisionspendeluhren sind zu beziehen von Strasser und Rohde, Glashütte in Sachsen, und Clemens Riefler, Nesselwang und München. Präzisions-Uhr- und Laufwerke, Räder, Triebe, Zahnstangen u. s. w. liefert ferner Otto Lindig, Glashütte.

Dieselbe Schwingungsdauer muß natürlich erzielt werden durch jede beliebige Kraft an Stelle der Schwere, wenn sie nur der Elongation proportional ist und f ihren Wert für die Elongation 1 bedeutet.

Beispielsweise kann eine Kette an beiden Enden an eine Schnur angehängt werden, welche über eine Rolle gelegt ist. Im Gleichgewichtszustande stellt sie sich so ein, daß die beiden Enden in gleicher Höhe sind. Wird nun das eine Ende um 1 m gehoben, so senkt sich das andere um 1 m und entsteht eine rücktreibende Kraft, welche gleich dem Gewicht von 2 m Kettenlänge ist. Läßt man die Kette los, so pendelt sie hin und her, bis die Energie durch Reibung vernichtet ist.

Wird beispielsweise statt einer Kette eine Spiralfeder von 1,85 m Länge und 2,3 kg Gewicht benutzt, so ist die Schwingungsdauer

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{f}} = 6{,}28 \sqrt{\frac{2{,}3 \,.\, 1{,}85}{9{,}81 \,.\, 2{,}3 \,.\, 2}} = 6{,}2 \text{ Sekunden.}$$

566. Federpendel. Ein Pendel, bei welchem die Wirkung der Schwerkraft durch die der Elastizität ersetzt ist, erhält man ohne weiteres aus der anfänglich besprochenen Federwage, bestehend aus einer 1,65 m langen Spiralfeder, an welche ein Gewicht von 5 kg angehängt wird. Zieht man das Gewicht stärker nach unten und läßt es wieder los, so pendelt es um die Gleichgewichtslage auf und ab. Die Schwingungsdauer ist wieder $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{f}}$, worin m die Masse des Gewichtes (diejenige der Feder vernachlässigt) und f die Spannung der Feder bei der Verlängerung um 1 m bedeutet. Da die 5 kg die Spirale auf 3 m, also um 1,35 m verlängern, ist

Fig. 3374.

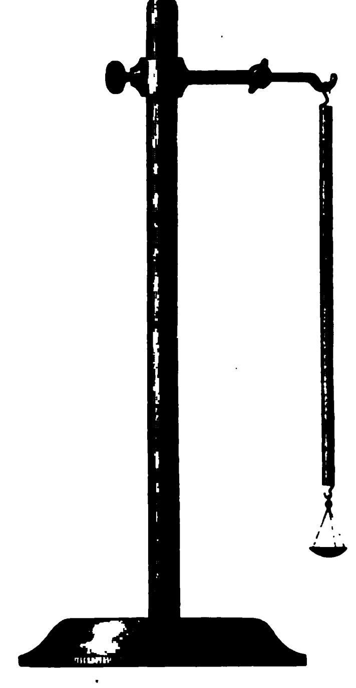


Fig. 3375.



$$f = 5/1{,}35 \text{ kg, also } T = 6{,}28 \,.\, \sqrt{\frac{5 \,.\, 1{,}35}{9{,}81 \,.\, 5}} = 2{,}3 \text{ Sekunden.}$$

Nach Eisenlohr nimmt man eine Drahtspirale, die am zweckmäßigsten aus Stahldraht (Klaviersaite) über einem etwa 5 mm dicken Drahte (Rundstahl) dicht aufgewickelt wird, von 2 bis 4 dm Länge, biegt ihre Enden erst gegen die Achse,

dann in der Richtung der Achse zu Ösen und hängt sie an einem Gestelle, wie in Fig. 3374, auf. An das untere Ende kommt eine Wagschale, deren Gewicht eine ganze Zahl Gramme beträgt.

Ein Federpendel, welches **Transversalschwingungen** ausführt, erhält man in gleicher Weise aus einer langen gespannten, an beiden Enden befestigten Spiralfeder, in deren Mitte ein Gewicht befestigt wird. Wird letzteres senkrecht zur Feder gezogen, so pendelt es beim Loslassen um so schneller hin und her, je stärker die Spannung der Feder und je kleiner seine Masse.

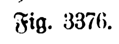
Eisenlohr benutzte dazu den Apparat Fig. 3375 (Lb, 45), mit welchem sich, ähnlich wie mit dem Gyroskop oder **Foucaults** Pendel, die Erhaltung der Schwingungsebene demonstrieren läßt, wenn man die Spirale so an dem Ringe festklemmt, daß sie die Richtung der Drehachse hat. Für andere Stellungen ergeben sich Abweichungen der scheinbaren Drehung wie bei **Foucaults** Pendel. Macht man z. B. den Winkel zwischen Spirale und Horizont = 30°, dessen Sinus = $1/2$ ist, und dreht nun den Ring um 180°, so werden die Schwingungen, wenn sie ursprünglich in der Ebene des Reifens erfolgten, zu dieser senkrecht, d. h. die Drehung beträgt nur $1/2 . 180°$.

Ferner kann man zu gleichem Zwecke einen dünnen federnden Stahlstab benutzen, welcher am einen Ende befestigt, am anderen durch ein Gewicht beschwert ist.

567. Oscillierendes Schwungrad mit Feder. Von besonderer Bedeutung für die Erklärung des Einflusses von Selbstinduktion und Kapazität bei Wechselstromleitungen ist die Behandlung eines durch Federkraft beeinflußten oscillierenden Schwungrades. Ich benutze dazu das bereits S. 1294 als Trägheitspendel verwendete oscillierende Schwungrad mit der Abänderung, daß an Stelle des Gewichtes die oben erwähnte 3 m lange Spiralfeder an der Schnur angebracht wird, deren anderes Ende am Boden befestigt wird.

568. Torsionsschwingungen. Man kann diese dadurch zeigen, daß man einen Draht an einen in der Decke oder in einem stabilen Gestell befestigten Haken bindet, unterhalb mit Gewicht beschwert und nun dem letzteren eine Drehung gibt. Verwendet man hierzu dicke Drähte, so müssen dieselben lang sein, damit die Oscillationen langsam werden. Man befestigt den Draht in der Regel durch Einklemmen am Stiel einer als Gewicht dienenden kreisrunden Scheibe, an deren Rand sich ein deutlicher Strich befindet (Fig. 3376), und beobachtet die Schwingungszeiten nach einem Pendel. Längs des Drahtes befestigt man zweckmäßig kleine Fähnchen aus Papier, welche, solange der Draht nicht tordiert ist, alle parallel sind. Man sieht dann, wie sich bei der Torsion des Drahtes die einzelnen Teile desselben gegeneinander verdrehen.

Fig. 3376.



Um die Abhängigkeit der Schwingungsdauer vom Trägheitsmoment des Gewichtes zu zeigen, wählt man als solches einen horizontalen Stab mit Einkerbungen an symmetrisch zur Drehachse gelegenen Stellen, an welche zwei gleich schwere Gewichte angehängt werden können. (Fig. 3377 K, 36.)

Die Berechnung der Schwingungsdauer kann ohne weiteres nach der Pendelformel erfolgen, da es natürlich ganz einerlei ist, ob das Drehungsmoment hervor-

gebracht wird durch die Schwerkraft oder irgend eine andere Kraft, z. B. die Torsionselastizität einer Feder, falls nur die Komponente, welche die pendelnde Masse gegen die Ruhelage hintreibt, ebenso wie beim Pendel proportional der Elongation ist. Bedeuten p das Gewicht des Pendels, l dessen Länge, φ den Ablenkungswinkel und α die Elongation, so ist die Kraft, welche die Pendellinse gegen die Ruhelage hintreibt (Fig. 3334, S. 1300), $K = p \,.\, \sin\varphi = p \cdot \frac{\alpha}{l} = f \,.\, \alpha$, wenn $p/l = f$ gesetzt wird.

Nun war

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma \mu \varrho^2}{p\, l}}, \quad \text{somit wird} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma \mu \varrho^2}{f \,.\, l^2}} \text{ Sekunden,}$$

worin f die Kraft bedeutet, welche die Elongation 1 hervorruft, oder

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma \mu \varrho^2}{f \alpha l} \cdot \sin\varphi}.$$

Hängt man z. B. an einen elastischen Draht, Fig. 3378, einen schweren horizontalen Stab in der Mitte auf, drillt den Draht um den Winkel φ und läßt dann den

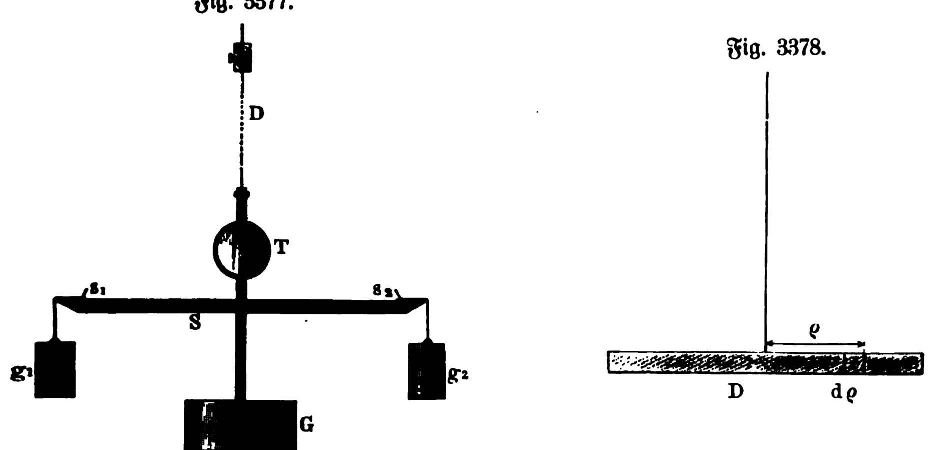


Fig. 3377. Fig. 3378.

Stab los, so wirkt auf letzteren die Torsionselastizität des Drahtes, welche der jeweiligen Elongation α proportional ist, also ebenfalls durch $f \,.\, \alpha$ dargestellt werden kann.

Das Drehmoment dieser am Hebelarm l wirkend gedachten elastischen Kraft ist $f \,.\, \alpha \,.\, l$. Wir können statt derselben natürlich eine entsprechend große andere Kraft an einem beliebigen anderen Hebelarm angreifend denken. Die Größe dieser gleichwertigen Kraft für den Hebelarm 1 m, welche ebenso wie $f \,.\, \alpha$ dem $\sin\varphi$ proportional sein muß, sei $P \,.\, \sin\varphi$, deren Moment also $P \,.\, \sin\varphi$.

Man hat dann $f \alpha l = P \,.\, \sin\varphi$ und

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma \mu \varrho^2}{P}}.$$

Setzt man statt $\sin\varphi$ φ, so wird die Kraft, welche am Hebelarm 1 m angreifend eine Torsion um φ m bedingt, $P \,.\, \varphi$, somit die Kraft, welche einer Drehung des Hebelarmendes um 1 m entspricht, P.

Die Größe derselben läßt sich leicht nach der früher gegebenen Formel aus dem Schubmodul des Drahtes berechnen.

569. Bestimmung des Schubmoduls. Nach S. 749 ist der Schubmodul $F = \frac{2.L.P}{\pi r^4}$ Kilogramm pro Quadratmeter, oder der millionste Teil dieses Wertes in Kilogramm pro Quadratmillimeter, oder das 98,1 fache in Dynen pro Quadratcentimeter, falls bedeuten: L die Länge des tordierten Drahtes in Metern, r den Querschnittshalbmesser in Metern, P die tordierende Kraft am Hebelarm 1 m wirkend in Kilogramm, welche eine Verdrillung um 1 Radiant erzeugt, d. h. die Spitze eines Zeigers von 1 m Länge um 1 m verschiebt.

Nun ergibt sich aus der vorigen Formel

$$P = \frac{4\pi^2 \Sigma \mu \varrho^2}{T^2},$$

also wird

$$F = \frac{8\pi . L . \Sigma \mu \varrho^2}{T^2 . r^4} \text{ kg pro qm.}$$

Hierbei bedeuten μ die Massen gemessen in Hyl, ϱ deren Abstand von der Drehachse in Metern und T die Dauer einer ganzen Schwingung.

Bedeuten μ' die Massen gemessen in Kilogramm, so daß $\mu = \frac{\mu'}{g}$ ist und t die gewöhnlich als „Schwingungsdauer" bezeichnete Dauer einer halben Schwingung, so wird

$$F = \frac{2\pi . L . \Sigma \mu' \varrho^2}{g . t^2 . r^4} \text{ kg pro qm.}$$

Könnte man den Stab als gewichtlos betrachten und wären an denselben im Abstand von 0,45 m von der Drehachse zwei Gewichte von je 8 kg angehängt, ist ferner $L = 4{,}66$ m und $r = 0{,}0014$ m und $T = 60$ Sekunden, so folgt

$$P = \frac{4 . 3{,}14^2 . 2 . 8 . 0{,}45^2}{9{,}81 . 60^2} = 0{,}0036 \text{ kg}$$

und

$$F = \frac{2 . 4{,}66 . 0{,}0036}{3{,}14 . 0{,}0014^4} = 2770 . 10^6 \text{ kg pro qm.}$$

Wäre der Stab nicht gewichtlos und auch nicht mit Gewichten belastet, so muß zunächst $\Sigma \mu \varrho^2$, das Trägheitsmoment, berechnet werden.

Sei die Gesamtlänge des Stabes D, das Gewicht desselben G, also das Gewicht eines Meters $\frac{G}{D}$, so ist das Gewicht eines kleinen Teilchens von der Länge $d\varrho$ (Fig. 3378) $\frac{G}{L} \cdot d\varrho$ und die Masse desselben $\mu = \frac{G}{g . D} \cdot d\varrho$, also:

$$\Sigma \mu \varrho^2 = 2 \int_0^{\frac{D}{2}} \frac{G}{g . D} d\varrho . \varrho^2 = 2 \frac{G}{g . D} \left[\frac{\varrho^3}{3}\right]_0^{\frac{D}{2}} = 2 \frac{G}{g . D} \frac{D^3}{24} = \frac{G . D^2}{12 . g},$$

somit

$$P = \frac{4\pi^2 . G . D^2}{12 . g . T^2} \text{ kg.}$$

Da dem Bogen 1 m bei 1 m Radius der Winkel $\frac{180^0}{\pi} = 57{,}30^0$ entspricht, so ist die Kraft P', welche eine Torsion um 1^0 hervorruft oder durch diese Torsion geweckt wird,

$$P' = \frac{\pi^3 . G . D^2}{540 . g . T^2} \text{ kg.}$$

Der Schubmodul wird:

$$F = \frac{8\pi . L . G . D^2}{r^4 . 12 . g . T^2} \text{ kg pro qm.}$$

Für eine Kreisscheibe vom Radius R und der Masse M mit vertikaler Achse ist $\Sigma \mu \varrho^2 = {}^1/_2 MR^2$. Man kann auch umgekehrt die Torsionsschwingungen zur **Bestimmung von Trägheitsmomenten** benutzen, welche sich direkt nicht wohl berechnen lassen, oder dazu die Richtigkeit der Rechnung zu prüfen. Ein hierzu geeignetes Torsionspendel, Fig. 3379, beschreibt Hartl, Z. 17, 353, 1904 [1]).

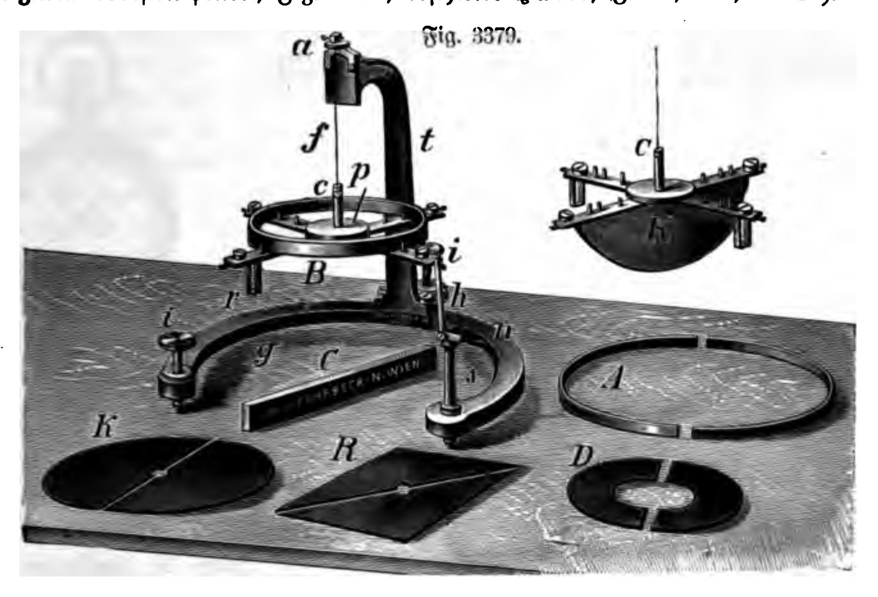
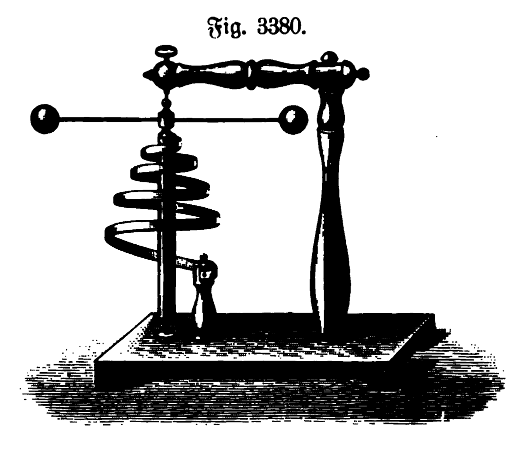


Fig. 3379.

570. **Die Unruhe.** Ein sehr einfaches, horizontal schwingendes Pendel mit Spiralfeder, welches das Prinzip der Unruhe darstellt, wurde angegeben von Majer (Fig. 3380 [2]).) Dasselbe gestattet auch das Coulombsche Gesetz, daß die Torsionskraft dem Torsionswinkel proportional ist (mag dieser auch einige hundert Grade betragen), nachzuweisen, was für das Verständnis mancher elektrischer Meßinstrumente von Wichtigkeit ist. Wird die Welle um 90°, 180°, 270°, 360° u. s. w. gedreht, so findet sich, daß die Anzahl der Schwingungen dem Torsionswinkel proportional ist und daß die Schwingungen ebenso isochron sind wie beim Pendel.


Fig. 3380.

Wenn man auch die Hemmung an den Taschenuhren besprechen will, so wird es erforderlich sein, groß ausgeführte Modelle, wenigstens der gewöhnlichen Cylinder-

[1]) Zu beziehen von W. J. Rohrbecks Nachf., Wien I, Kärntnerstr. 59. Über die Benutzung des Trägheitsmoments zur Bestimmung der Fallbeschleunigung siehe Höfler, Z. 14, 15, 1901. — [2]) Zu beziehen von Dr. Houdek u. Hervert in Prag zu 6 fl.

und Ankerhemmung zu haben. Fig. 3381 (Lb, 60) zeigt ein Modell einer Cylinderhemmung, Fig. 3382 (Lb, 60) ein Modell einer Ankerhemmung.

Hierher gehört ferner die Besprechung der Kompensationsunruhe, der Einrichtung einer Taschenuhr und eines Chronometers[1]), Verwendung des letzteren



Fig. 3381.

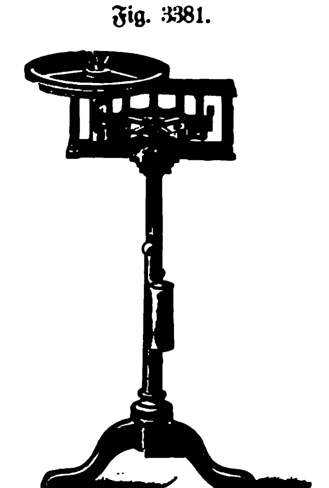
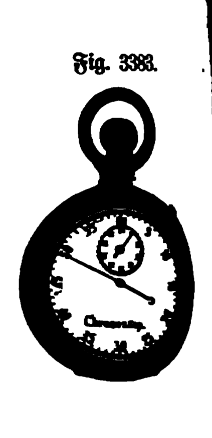
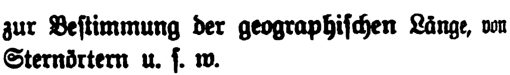


Fig. 3382.



Fig. 3383.

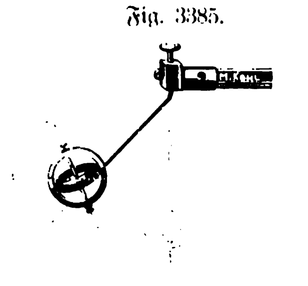




zur Bestimmung der geographischen Länge, von Sternörtern u. s. w.

Fig. 3384.

Fig. 3385.



571. Polygonalpendel nach Gruey. Die Achse eines Kreisels bildet die Verlängerung eines Stabes, welcher kardanisch an einem Stativ aufgehängt ist. (Fig. 3384 Lb, 70.)

Rotiert der Kreisel nicht und hat man ihn aus der Gleichgewichtslage gebracht, so schwingt das Ganze wie ein gewöhnliches Pendel. Versetzt man dagegen den Kreisel in Rotation und bringt ihn aus der Gleichgewichtslage, so beschreibt die an der tiefsten Stelle angebrachte Spitze ein einem Kreise eingeschriebenes Polygon, weil zur Wirkung der Schwere noch die Wirkung der auf S. 1247 besprochenen induzierten Kraft hinzukommt.

572. Kegelpendel nach Gruey. An einem Stativ, ähnlich demjenigen der Fig. 3384, hängt an einem Kautschukfaden ein Kreisel. (Fig. 3385 K, 65.)

Man dreht den Faden mehrmals um sich selbst, zieht den Kreisel auf und bringt ihn in

[1]) Einfache Taschenchronoskope (Fig. 3383) liefert Müller-Uri, Braunschweig, zu 22 Mk., ein großes Modell einer Ankerhemmung mit Unruhe Diederichs (Spindler u. Hoyer), Werkstätte für wissenschaftliche Präzisionsinstrumente, Göttingen (zu 75 Mk.).

die Gleichgewichtslage, ohne ihm irgend welche Anfangsgeschwindigkeit zu geben. Die horizontale Achse des Kreisels stellt sich bald schräg, der Kreisel kommt aus der Gleichgewichtslage heraus und beschreibt nun mit dem Kautschukfaden einen Kegel. Nach einiger Zeit kommt der Kreisel wieder in die Gleichgewichtslage zurück. Da jetzt aber der Kautschukfaden in entgegengesetzter Richtung aufgedreht ist, so bewegt sich der Kreisel wieder aus der Gleichgewichtslage, beschreibt mit dem Faden wieder einen Kegel, jetzt aber in entgegengesetztem Sinne, u. s. w.

L. van Schaik (Z. 7, 181, 1894) befestigt einen Kreisel, wie Fig. 3386 zeigt, welcher an einer Stelle (*a*) durch eine kleine Bleimasse beschwert ist, am Ende eines federnden, in einen Schraubstock eingespannten Stahldrahtes. Sobald die Geschwindigkeit des Kreisels soweit abgenommen hat, daß eine Periode der der Breitevibrationen der Feder nahe kommt, gerät diese in heftige Schwingungen, welche rasch abnehmen, wenn der Unterschied zwischen beiden Perioden zu groß wird, so daß das System wieder zur Ruhe kommt. Später aber wird die Periode des Kreisels den langsamsten Schwingungen der Feder gleich, wodurch diese abermals in Schwingungen von großer Amplitude versetzt wird, welche ebenso wie die vorigen von einer zahlreichen Gesellschaft gesehen werden können.

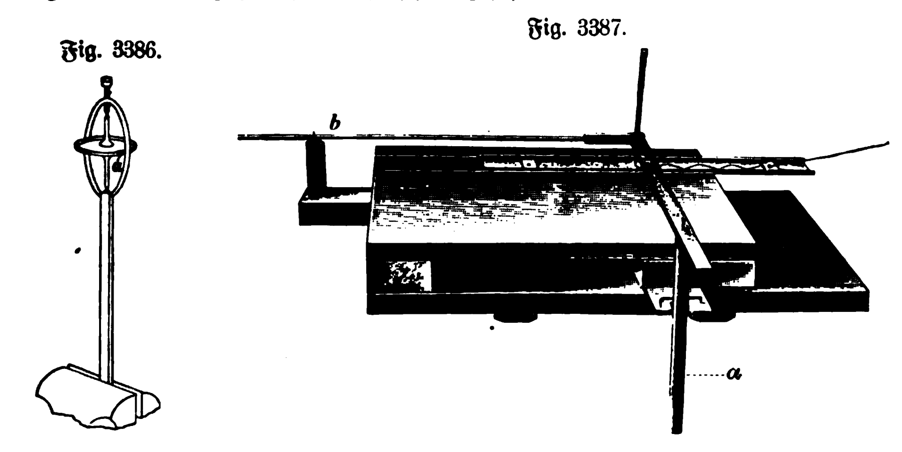


Fig. 3386. Fig. 3387.

573. **Schreibendes Pendel.** Ich benutze hierzu ein schweres, ähnlich wie Fig. 3389, an der Decke aufgehängtes und mit einem mit Sand gefüllten Trichter versehenes Pendel, unter welchem ein langer weißer Papierschirm senkrecht zur Schwingungsebene gleichmäßig fortgezogen wird. Der ausströmende Sand häuft sich auf diesem in Form einer Sinuslinie an.

Oosting (Z. 8, 189, 1895) beschreibt die in Fig. 3387 dargestellte Vorrichtung. Das Pendel *a* wirkt auf eine mit Tinte gefüllte Glasfeder, welche durch den drehbaren Stab *b* Führung erhält und zeichnet die Schwingungen auf einen Kartonstreifen, welcher langsam fortgezogen wird, etwa durch das Uhrwerk eines Morsetelegraphen. Zweckmäßiger läßt man die Wellenlinien durch einen Stahlstift auf eine berußte Glasplatte zeichnen, oder eine Glasplatte, welche nach Elsässer mit Maschinenöl abgerieben und sodann mit Lykopodium (besser wären wohl Bovistapollen) bestäubt wird (Projektion).

Eine Anwendung des schreibenden Pendels bildet der oben (S. 1217 ff., Fig. 3165 und 3166) beschriebene Apparat von Hrabowski (Z. 9, 24, 1896). Um mittels desselben die Gesetze der beschleunigten Bewegung graphisch nachzuweisen, schiebt

man eine besondere Schreibfeder ein, durch welche der Schreibstift des Dynamometers außer Wirkung gesetzt wird, und befestigt am unteren Ende des Dynamometers eine Pendellinse. Der Wagen wird durch letztere in ein „Fahrendes Pendel" umgewandelt, welches um die Kante der Schiene ss_1 in der Richtung senkrecht zur Schreibtafel schwingen kann, sobald man durch Verstellung der Fußschrauben den Apparat etwas nach vorn überneigt. Der Auslöshaken *h* hat an seiner Schneide eine Schrägung; wird der Wagen aus dieser ausgelöst (in schräger Pendellage), so erfolgen während der Fahrt die Pendelschwingungen. Die Schreibfeder gibt je nach der verschiedenen Bewegung des Wagens in verschiedenen Abständen Striche auf der Glastafel an, durch deren Mitten die Bewegung des Wagens bestimmt worden ist.

574. Lissajous' Figuren. Wird bei dem schreibenden Pendel der Kartonstreifen nicht gleichmäßig fortgezogen, sondern durch ein senkrecht zum ersten schwingendes Pendel bewegt, so entstehen sogenannte Lissajous'sche Figuren. Zu gleichem Zwecke dient der etwas komplizierter eingerichtete Harmonograph von Tisley und Tissandier, welcher in Fig. 3388 skizziert ist. (Lb, 120.)

Fig. 3388.



Auch in diesem Falle kann man die Figuren in großem Maßstabe erhalten, indem man den Sandtrichter des in Fig. 3389 dargestellten Versuches als einfaches Pendel gestaltet und das Papierblatt auf einem an Schnüren aufgehängten Brette befestigt, welches in einer zur Schwingungsebene des ersteren senkrechten Ebene pendelt.

Crova (1881) erreicht denselben Zweck in anderer Weise. Ein schweres Pendel (ähnlich wie das zu dem Foucaultschen Versuche gebrauchte) ist an der Decke des Zimmers aufgehängt und unten mit einer Schreibspitze versehen. Unter diesem, genau in der gleichen Vertikale, ist ein zweites, zusammengesetztes Pendel angebracht, welches nach Art eines Reversionspendels mit zwei Linsen über und unter der Drehungsachse versehen ist, von welchen die eine dauernd befestigt ist, die andere sich verschieben läßt. Am oberen Ende trägt die Pendelstange eine symmetrisch aufgesetzte, cylindrisch gekrümmte Platte von solchem Krümmungsradius, daß die Cylinderachse zusammenfällt mit der Drehachse des Pendels. Bei den Schwingungen des Pendels bleibt dann die Schreibspitze des oberen Pendels in stets gleicher Entfernung von dieser Platte. Setzt man letzteres senkrecht zu ersterem in Schwingung, nachdem Stift und Platte in Berührung gebracht sind, so beschreibt ersterer auf letzterer die Lissajousschen Figuren. Für die wichtigsten Schwingungsverhältnisse geben Marken auf der Pendelstange die dazu nötige Stellung des verschiebbaren Gewichtes an. Ein anderer derartiger Apparat von Bazzi (1882) mag hier nur genannt werden.

575. **Das Doppelpendel**[1]). Auf zwei senkrechten Holzstäben (Fig. 3389) von 1,04 m Höhe ist ein Querbalken von 45,7 cm Länge befestigt, welcher nahe den Enden durchbohrt ist, um dünne Schnüre durch die Löcher ziehen zu können. Die Enden derselben werden an dem drehbaren Zapfen *F*, welcher ähnlich dem Stimmwirbel einer Geige durchbohrt ist, befestigt und tragen unten eine Pendellinse, bestehend aus einem Bleiring von 8 cm äußerem, 2,5 cm innerem Durchmesser und 1,6 cm Dicke. Dieselbe wird von drei Schnüren von je 25 cm Länge, ähnlich wie eine Wagschale, getragen, welche bei *s* mit den erstgenannten Schnüren von 2,7 m Gesamtlänge verknüpft sind. Die beiden Schnüre werden durch einen verschiebbaren Ring *r* aus Kupferdraht auf eine mehr oder minder große Strecke *rs* zusammengehalten. In den bleiernen Ring wird ein mit Sand gefüllter Glastrichter eingesetzt, das Pendel aus seiner Gleichgewichtslage abgelenkt und durch einen unter 45° gegen die Verbindungslinie der Säulen an dem seitlichen Holzpflock *D* angebundenen Faden in dieser Lage gehalten. Sobald der Apparat in völliger Ruhe sich befindet, brennt man diesen Faden durch, so daß das Pendel schwingen kann. Der Sand häuft sich dann auf einem untergelegten Blatt Papier in Form einer der Lissajousschen Figuren an, deren Form von der Länge des Stückes *rs* abhängt. Schiebt man den Ring *r* so weit hinauf, daß er 1/4 m von der Mitte der Bleischeibe entfernt ist, dagegen die Länge des ganzen Pendels = 1 m beträgt, daß also das große Pendel viermal so lang ist, als das untere kleine und folglich zweimal so große Schwingungszeit besitzt wie dieses, so erhält man die Form 1 der Fig. 3390. Die weiteren Formen entsprechen folgenden Intervallen: 2 der Quinte (Schwingungsverhältnis 2:3, Pendellängen 1000 und 444,4 mm); 3 der Quarte (3:4, 1000 und 562,5); 4 der großen Terz (4:5, 1000 und 640); 5 der kleinen Terz (5:6, 1000 und 694,4); 6 der verminderten kleinen Terz (6:7, 1000 und 734,6); 7 der vermehrten Sekunde (7:8, 1000 und 766,6); 8 der Sekunde (8:9, 1000 und 790,1).

Fig. 3389.

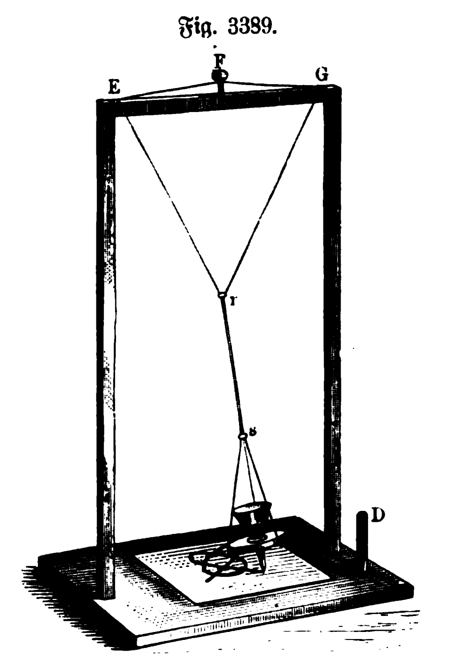


Fig. 3390.



[1]) H. Airys Doppelpendel (1871), verbessert von Blackburn (oder Savan) ist beschrieben in A. M. Mayers „Sound“, New York 1878 und Nat. XVIII, später nochmals von Weinberg, Beibl. 1881, S. 565.

Macht man $rs = 0$, so daß das Ganze als einziges Pendel schwingt und lenkt das Pendel senkrecht zur Verbindungslinie der Säulen nach vorn ab, während man gleichzeitig das Papier in der Richtung dieser Linie verschiebt, so verzeichnet der Sand auf demselben eine gewöhnliche Sinuslinie.

Fig. 3391.

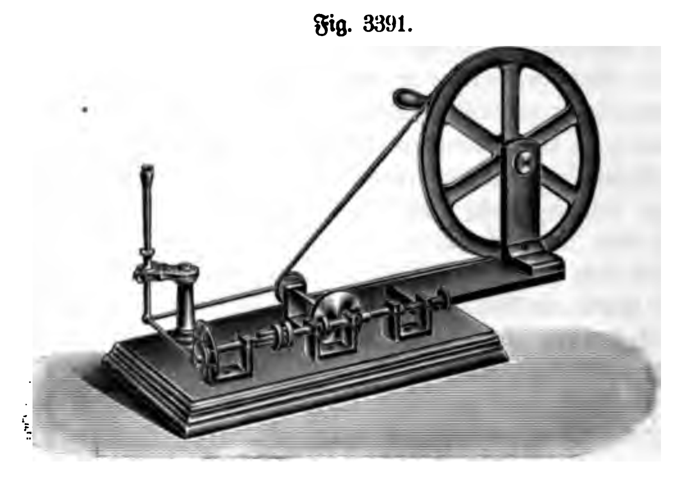
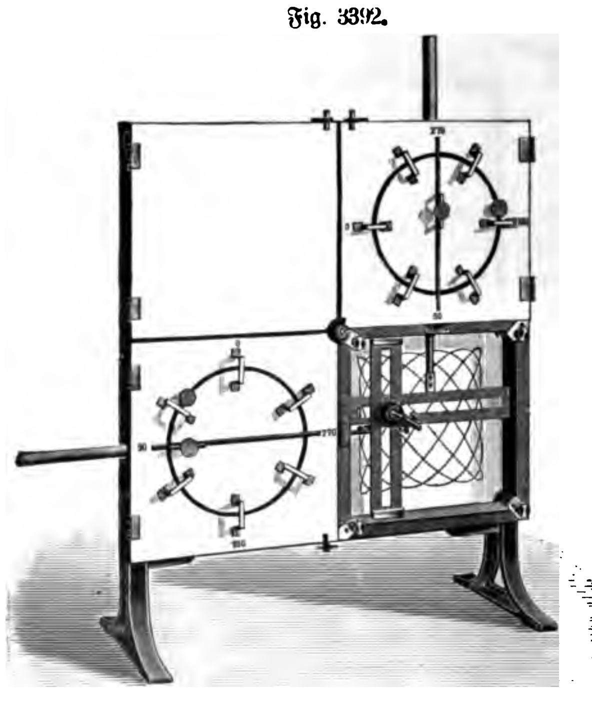


Fig. 3392.



Bei dem Verbundpendel von Tisley[1]) wirken zwei zueinander senkrecht schwingende Pendel durch Kuppelungsstangen auf dieselbe Schreibspitze, ähnlich wie die beiden Bläuelstangen bei dem in Fig. 3391 (Lb, 200) dargestellten Apparate, welcher zur mechanischen Zeichnung der Lissajousschen Figuren dienen kann. Zu gleichem Zweck geeignet ist auch der Apparat von Bergmann (Fig. 3392 E, 165), welcher nach dem oben S. 1301 Gesagten wohl ohne weitere Beschreibung verständlich sein dürfte.

Andere Apparate zur mechanischen Darstellung der Lissajousschen Figuren sind von Pfaundler (S, 100), Stöhrer (S, 65) und P. Czermak (1883) angegeben worden. Pfaundlers Apparat beruht auf der Durchkreuzung zweier sich verschiebender Wellenlinien. Der Stöhrersche Apparat ist dargestellt in Fig. 3393. Die beiden mit Schlitzen versehenen Platten f, f^1 werden durch Räderkombination rechtwinklig zueinander in Bewegung gesetzt. Da das große Zahnrad in einem mit dem oberen Rade c konzentrischen Schlitze verstellbar ist, kann man auf die Achse des unteren Zahnrades c^1 beliebig

---

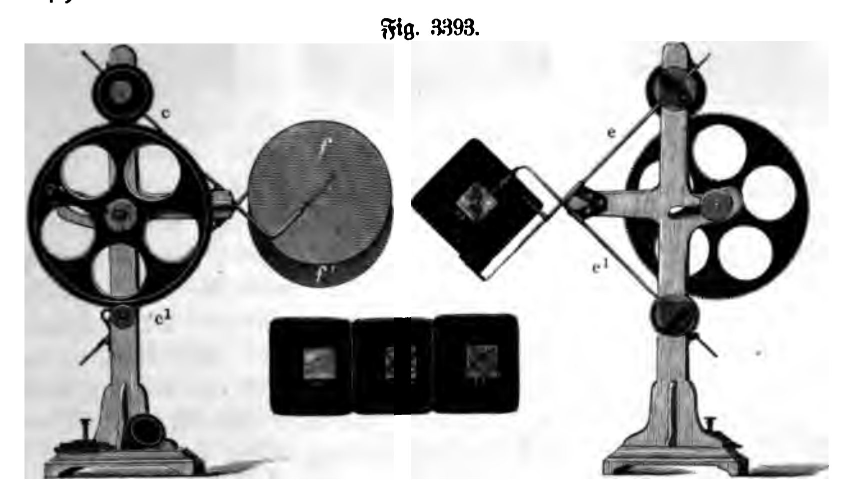
[1]) Abbildung siehe Winkelmann, Handbuch der Physik 1, 862, Breslau 1891.

große Räder befestigen; es werden dem Apparate solche mit 60, 50, 48, 40, 36, 30, 24 und 20 Zähnen beigegeben. Der Apparat gestattet folgende Versuche:

1) Sind an Stelle von *c* und c^1 Räder von je 60 Zähnen eingesetzt, so erscheint eine geradlinige, kreisförmige oder elliptische Schwingungsfigur, die beliebig lange konstant erhalten werden kann.

2) Ersetzt man das obere Rad *c* von 60 Zähnen durch das beigegebene von 59, so wechseln die Phasendifferenzen allmählich, die Schwingungsfigur ändert sich periodisch.

Fig. 3393.



3) Wählt man die Zahlen der Zähne im Verhältnis wie 60:30, 60:48 u. s. f., so erhält man die Schwingungsfiguren, welche bei Kombination zweier aufeinander senkrechter Schwingungen entstehen, deren Zeitdauer im Verhältnis von 1 : 2, 4 : 5 u. s. f. steht.

Fig. 3394.

4) Setzt man an Stelle der beiden Scheiben ff^1 eine einseitig berußte Glasplatte und eine federnde Stahlspitze, so lassen sich die Schwingungsfiguren graphisch darstellen und man kann dieselben durch Überziehen der Platte mit einem Lack (mittels eines Zerstäubers) dauernd fixieren.

P. Czermak (1883) hat den Apparat bezüglich der mechanischen Einrichtung verbessert [1]), so daß man, vom Unisono angefangen, alle Verhältnisse bis zur Oktave 1:2 stetig durchlaufen lassen kann. Man sieht also auf dem Schirme allmählich eine Figur in die andere übergehen. Der Apparat hat außerdem noch den Vorzug, daß die Bewegungen vollkommen reine Sinusbewegungen sind [2]).

Trägt man mit schwarzer Farbe auf einen weiten Glascylinder eine in sich zurücklaufende Wellenlinie mit einer etwa dem Durchmesser des Cylinders gleichkommenden Amplitude auf und projiciert diese als Schattenbild auf einen

---

1) Der Apparat ist zu beziehen von Mechaniker Joseph Gitz in Wien VI, Stumpergasse 10. Eine genaue Beschreibung findet man in der Centralzeitung für Optik und Mechanik 4, 145 bis 146. — 2) Einen kleineren Apparat für Projektion von Dr. Stöhrer u. Sohn, Leipzig, zeigt Fig. 3394.

weißen Schirm, so erhält man eine Lissajoussche Figur, welche bei Drehung des Cylinders ihre Form ändert[1]).

Fig. 3395.



Fig. 3396.



Fig. 3397.



576. **Erzwungene Schwingungen.** Hängt man ein Federpendel, etwa bestehend aus einem Kautschukfaden mit angehängtem Gewicht, welches Längsschwingungen ausführt, an einem Haken auf, der durch einen Kurbel- oder Exzentermechanismus auf- und abbewegt wird, so beobachtet man, daß, wenn die Umlaufsdauer der Kurbel übereinstimmt mit der Schwingungsdauer des Pendels, die Amplitude abnorm groß wird, während sie im entgegengesetzten Falle, dem der erzwungenen Schwingung, verschwindend klein werden kann, indem sich nur der Kautschukfaden spannt und entspannt, ohne daß sich das anhängende Gewicht merklich bewegt. Gleiches gilt für ein oscillierendes Schwingungsrad, welches lose auf seiner Welle sitzt und nur durch eine Spiralfeder mit dieser zusammenhängt, für den Fall, daß man die Schwingungen durch einen Kurbelmechanismus mit variabler Umdrehungszahl erregt, welcher die Welle hin- und herdreht. Bei Übereinstimmung der Schwingungszahlen wird die Amplitude sehr groß, es tritt Resonanz ein.

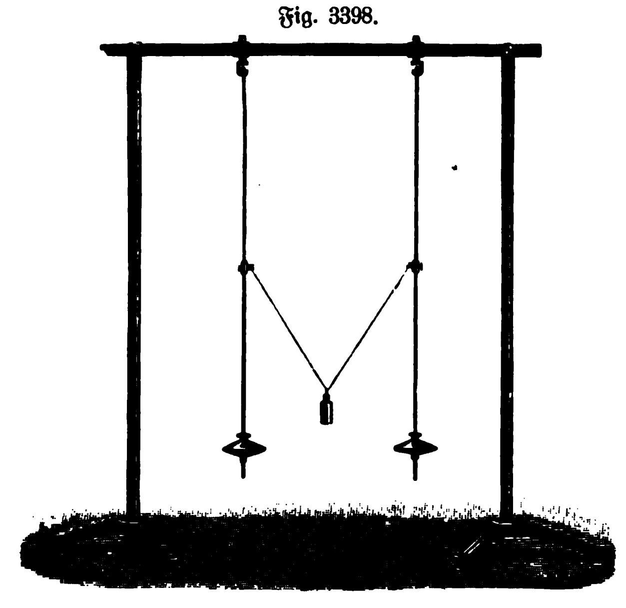
Die Theorie[2]) ergibt, daß die erzwungene Schwingung zwar dieselbe Schwingungsdauer hat, wie die periodisch wirkende Kraft, daß dagegen ihre Phase verschoben ist (Phasenverschiebung). Der Phasenunterschied läßt sich leicht aus der Verzögerungszeit ermitteln. Im allgemeinen sind die Schwingungen stets auch durch Reibungswiderstände gedämpft.

577. **Schwebungen zweier Pendel.** Nach Riecke (Phys. Zeitschr. 3, 130, 1902) kann man Schwebungen bekommen, wenn man an ein Pendel, bestehend aus einem Zweikilogrammgewicht, welches an einem Draht von 30 cm Länge hängt, ein sehr leichtes Fadenpendel von nahe der gleichen Schwingungsdauer aufhängt und dem Gewicht einen schwachen Anstoß erteilt. Während dieses nur um wenige Millimeter hin und her schwingt, macht das Federpendel zeitweise Schwingungen bis zu 90 Grad und mehr.

578. **Resonanz.** Kann (Z. 14, 295, 1901) steckt zur Demonstration des Mitschwingens auf die Pendelstange eines gewöhnlichen Metronoms einen dünnen

[1]) Die Darstellung von Lissajous' Figuren nach Fig. 3395, 3396 und 3397 siehe Gray, Lehrbuch der Physik, Braunschweig 1904, S. 83. Über verschiedene andere optische Mittel zur Darstellung der Figuren siehe Costing, Z. 2, 190, 1889; 8, 190, 1895; 11, 221, 1898 und Holtz, Z. 7, 226, 1894. — [2]) Siehe Riecke, Lehrbuch der Physik, 2. Aufl., Leipzig 1902, Bd. I, S. 93.

umelhaarpinsel mit möglichst weichen langen Haaren und läßt diesen anstreifen an ı größeres darüber aufgehängtes Pendel aus Blei, welches in der gleichen Ebene ıwingen kann. Sind die beiden Schwingungsdauern gleich, so kommt letzteres ıch und nach in beträchtliche Schwingungen, sind sie hingegen auch nur wenig ver-ieden, so bleibt es in Ruhe, ausgenommen den Fall, wo die eine Schwingungs-t ein ungerades Vielfaches r anderen ist.


Fig. 3398.

Oberbeck (1888) be-ınt sich der in Fig. 3398 gegebenen Vorrichtung. vei Pendel sind durch ıen Faden miteinander rbunden, welcher durch ı angehängtes Gewicht spannt wird. Setzt man s eine Pendel in Schwin-ıngen, so wird durch den ıden die Bewegung nach ıd nach vollständig auf s zweite übertragen, wäh-ıd das erste zur Ruhe ımmt, worauf dann um-kehrt das erste durch das ıeite, dann wieder das ıeite durch das erste u. s. w. in Bewegung gesetzt wird. Die Übertragungszeit um so größer, je kleiner das den Faden spannende Gewicht.

Sind die Linsen der beiden Pendel nicht gleich schwer, so werden die Ampli-den des leichteren Pendels größer.

Sind die Längen der Pendel ungleich, so erfolgt die Übertragung der Be-ıgung in entsprechend geringerem Maße, bei großer Differenz gar nicht. Man nn die beiden Pendel sowohl in ihrer Ebene wie auch senkrecht dazu schwingen ıssen und so die Übertragung von Longitudinal- und Transversalwellen erläutern.

579. **Fortschreitende Wellen.** Zu letzterem Zwecke gibt man dem Gestell s Apparates so große Länge, daß man 3, 4, 5 u. s. w. Pendel in gleicher Weise ızufügen kann. Im einfachsten Falle erfolgt die Übertragung der Schwingungen ıch Fig. 3399, 1 bis 6, d. h. es bildet sich eine fortschreitende Welle [1]).

K. T. Fischer (1902) verwendet ein System von Bleipendeln, deren Kugeln ırch einen Kautschukfaden miteinander verbunden sind. Die Wellenbewegung langt sich so langsam fort, daß man das Fortschreiten deutlich verfolgen kann; die ısschläge betragen bis zu 30 cm, die Körper sind 500 g schwer, ihre Zahl beträgt ı, der gegenseitige Abstand 7,5 cm und die Dicke der Paragummischnur 2 mm.

S. P. Thompson (Phil. Mag. [5] 9, 75, 1880) macht darauf aufmerksam, ıß man auch den gewöhnlichen Stoßapparat zur Demonstration transversaler

[1]) Denkt man sich nach Mach auf einen Glascylinder eine Schraubenlinie aufgetragen, ı Schattenbild desselben auf einen weißen Schirm projiziert und nun den Cylinder um ıne Achse gedreht, so erhält man eine bildliche Darstellung der fortschreitenden Welle.

Wellen benutzen kann, wenn die Kugeln desselben hohle Kautschukkugeln sind, da die Reibung derselben gegeneinander zur Bildung transversaler Wellen genügt. Derselbe (Z. 11, 85, 1898) konstruierte zur Darstellung Hertzscher Wellen nach

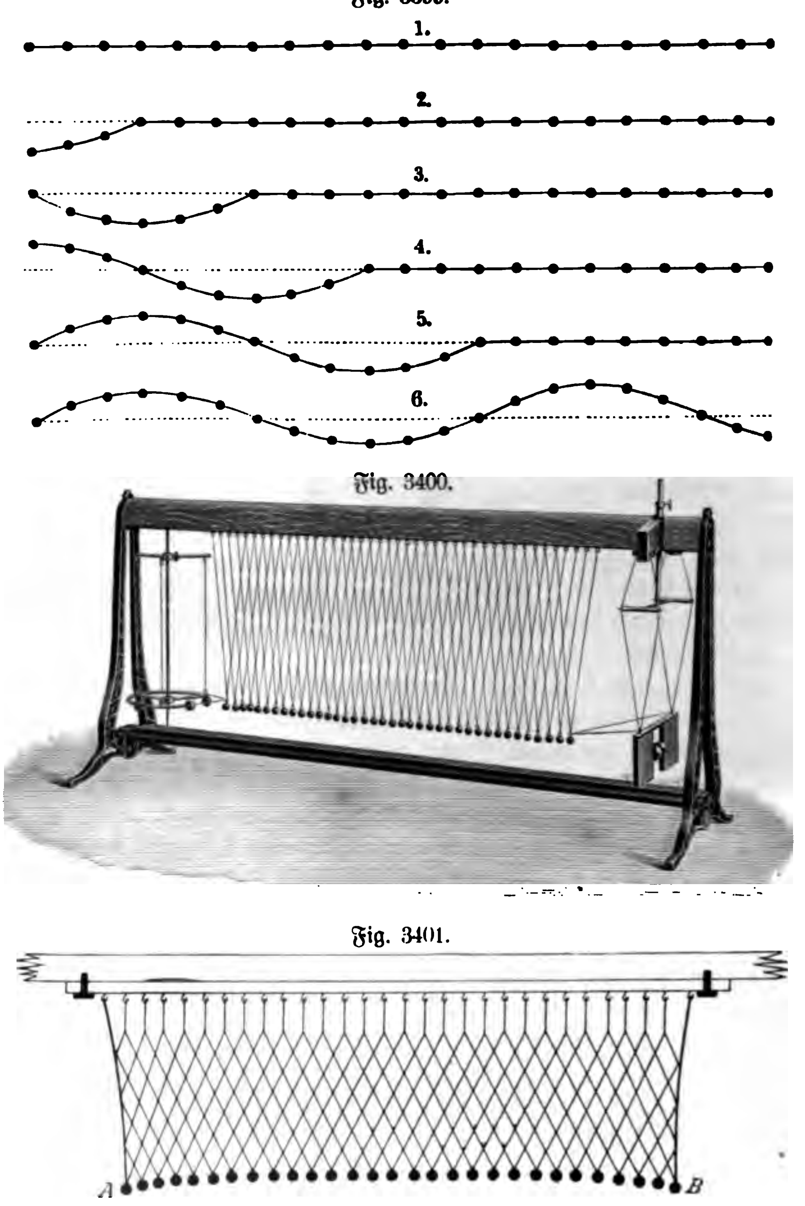


Fig. 3399.

Fig. 3400.

Fig. 3401.

einem schon von Reynolds (1877) angewandten Prinzip die in Fig. 3400 (K, 115) dargestellte Wellenmaschine, bestehend aus einer Reihe miteinander verbundener Pendel, in welchen sich eine Querwelle so langsam fortpflanzt, daß man sie mit den Augen bequem verfolgen kann.

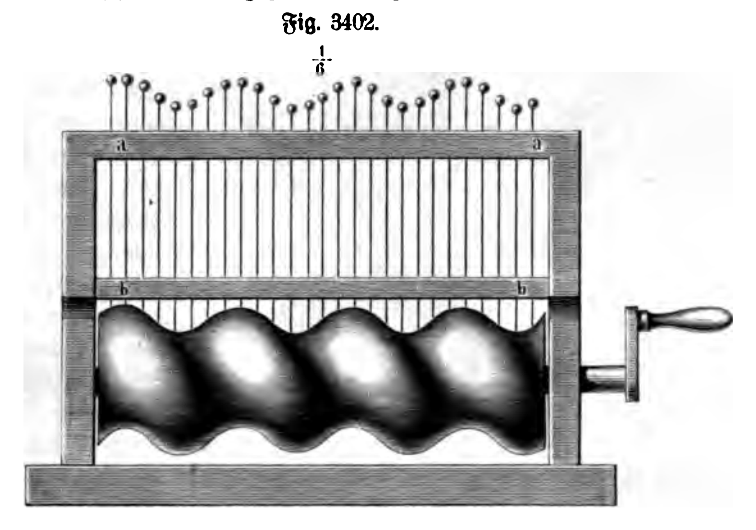
Eine Wellenmaschine, welche das Zustandekommen der Wellenbewegung veranschaulicht, konstruiert v. Rostowzew (Z. 16, 274, 1903) nach Fig. 3401 in der

Weise, daß er an einem Brett, welches an der Decke befestigt wird, an einer Serie von Häkchen ein Netz aus dünnen Fäden befestigt und dasselbe durch eine Serie von Bleikugeln beschwert. Anfänglich bilden diese Kugeln eine gerade Linie *A* bis *B* (Fig. 3401). Wenn man eines der Endkügelchen schnell einmal hin und her bewegt, so bildet sich eine Transversalwelle, welche nach und nach zum anderen Ende geht, dort reflektiert wird u. s. w. Wenn man ein Endkügelchen fortwährend hin und her bewegt, so erhält man eine stehende Wellenbewegung.

580. **Wellenmaschinen für Transversalwellen.** Eine ältere Konstruktion der Transversalwellenmaschine ist in Fig. 3402 abgebildet.

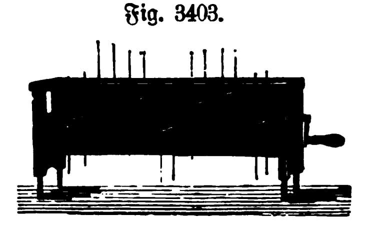
Fig. 3402.

$\frac{1}{6}$



Sie besteht aus einer hölzernen gewundenen und durch eine Kurbel drehbaren Walze, zu deren Anfertigung meist jeder Holzdreher eingerichtet ist; dieselbe muß aber aus hartem dichtem Holze gemacht und sorgfältig abgeschliffen werden. In dem Gestelle der Walze sind eine Anzahl starker Stricknadeln in genau senkrecht übereinander stehenden Löchern der beiden Leisten *aa*, *bb* leicht beweglich und tragen oberhalb Glasperlen. Wird die Walze gedreht, so machen alle Perlen die Bewegung. Die unteren Enden der Nadeln müssen recht gut abgerundet und geglättet werden, weil sonst leicht Stockungen eintreten und einzelne Drähte verbogen werden können. Darum ist es auch zweckmäßig, die Walze schnell umzudrehen.

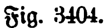
Fig. 3403.



Eine Abänderung nach Eisenlohr zeigt Fig. 3403 (E, 33), eine solche nach Goldstein Fig. 3404 (E, 130).

Stöhrer richtet den Apparat so ein, daß die Schwingungen mittels des Projektionsapparates auf einem Schirm dargestellt werden können. Die Schraubenwalze ist dabei so geändert, daß auf der Achse dicht nebeneinander spiralig angeordnet viele Exzenter aufgesetzt sind. Die Stäbchen sind breit und haben in der Mitte eine Öffnung, durch welche die Lichtstrahlen durchdringen und helle Lichtpunkte auf dem Schirm erzeugen. (Fig. 3405 K, 46; Fig. 3406 Lb, 46; Fig. 3407 L, 63.)

Die Wellenmaschine von Mach gleicht einigermaßen dem Stoßapparat, insofern in horizontaler Reihe nebeneinander eine Anzahl kleiner Kugeln an je zwei divergierende Fäden angehängt sind, doch nicht so, daß sie sich berühren, sondern relativ große Zwischenräume zwischen sich lassen. Die beiden Leisten, an welchen die Fäden befestigt sind, sind durch Querstäbe mit Scharnieren miteinander verbunden, so daß man sie leicht einander nähern oder wieder trennen kann. Bei der Näherung verschiebt sich gleichzeitig die bewegliche etwas in ihrer Richtung, so daß die Aufhängepunkte der Fäden doch in gleichem Abstande bleiben. In dieser Anordnung (Fig. 3408) ist der Apparat für Demonstration transversaler Wellen geeignet, in der ursprünglichen dagegen für longitudinale. Da die Umstellung sich leicht auch während der Bewegung der Kugeln bewirken läßt, so kann man in sehr hübscher Weise momentan eine transversale Wellenbewegung in eine longitudinale übergehen lassen und umgekehrt.


Fig. 3404.



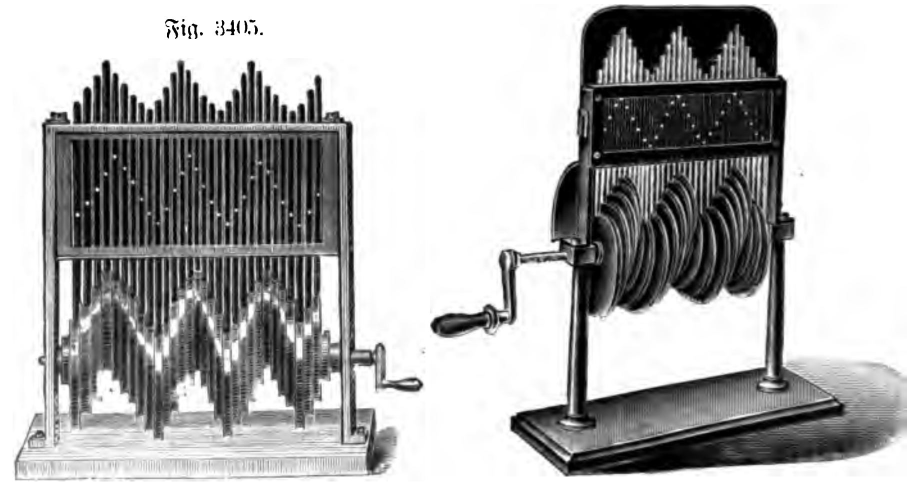
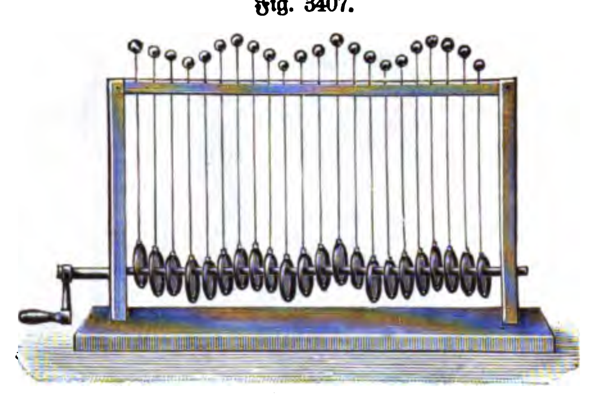

Fig. 3405.

Fig. 3406.

Will man zunächst transversale Wellen demonstrieren, so werden die beiden Leisten dicht aneinander gelegt, die Kugeln durch ein Lineal *ik* alle gleichzeitig zur Seite geschoben und dieses in eine Nut eines zweiten Lineals eingelegt. Zieht man nun *ik* längs seiner Achse weg, so fällt eine Kugel nach der anderen zurück, sie

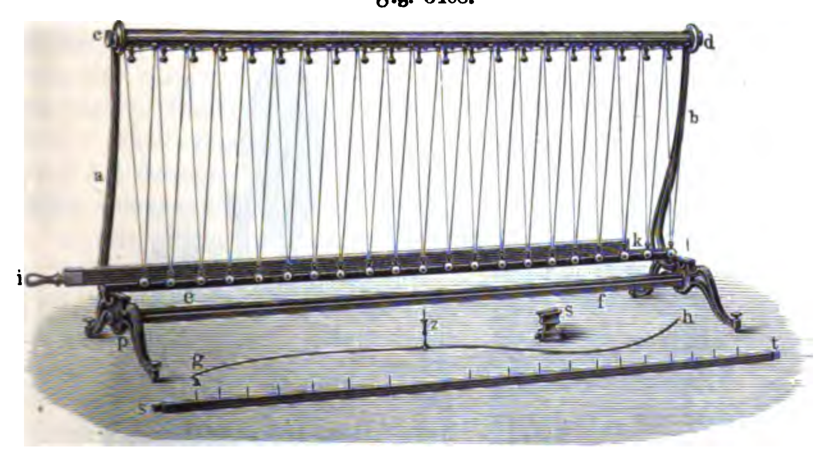
mmen in regelmäßiger Zeitfolge nacheinander in denselben pendelnden Zustand, t etwas später als die vorhergehende. Infolgedessen stellen sie eine transversale tschreitende Welle dar. Durch Entfernen der Leisten voneinander wandelt man in eine longitudinale um. Man kann auch mit letzterer beginnen, indem man Kugeln in Vertiefungen s Lineals einlegt, welche richtigen alternierend gerin- en und größeren Abständen en, und dann das Lineal glich durch Wegziehen nach en entfernt.

Fig. 3407.



Nimmt man ein Lineal der Form einer Wellen- e, so bilden sich stehende nsversale Schwingungen, die der in longitudinale ver- ndelt werden können. Man wendet hierzu den Draht *gh* (Fig. 3408), setzt dessen Stift *z* in ein Loch ten in der Leiste *ef* und bringt die Kugeln teils auf die eine, teils auf die

Fig. 3408.



dere Seite des Drahtes. Dreht man nun den Draht rasch zur Seite, so läßt plötzlich alle Kugeln frei. *st* erzeugt ebenso stehende Longitudinalwellen.

Um fortschreitende Longitudinalwellen zu demonstrieren, setzt man, nachdem die hwingungsebene parallel zu *cd* gestellt ist, das Gleitstück *s* an den Anfang der hiene *ef* und zieht es gleichmäßig fort, wodurch die Kugeln abgelenkt, alle die- be Schwingung ausführen, aber immer eine später als die andere[1]).

Woodward (1876) hat eine derartige Maschine in sehr großem Maßstabe sgeführt (Kugeln von 1 Zoll Durchmesser und je 3 Zoll Entfernung).

Von Pfaundler und Rousseau wird hinter einem undurchsichtigen Schirm t zahlreichen äquidistanten Schlitzen eine Glasplatte verschoben, auf welcher durch- htig auf undurchsichtigem Grunde eine Wellenlinie gezeichnet ist. Die Kreuzungs-

[1]) Verschiedene Verbesserungen beschreibt Mack, Z. 16, 265, 1903.

stellen derselben mit den vertikalen Schlitzen erscheinen bei der Beleuchtung von der Rückseite als helle Punkte, welche eine Wellenbewegung ausführen [1]).

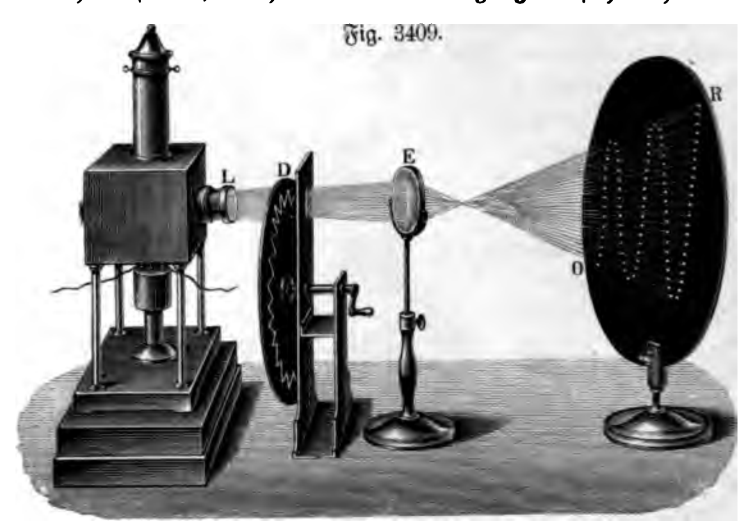


Fig. 3409.

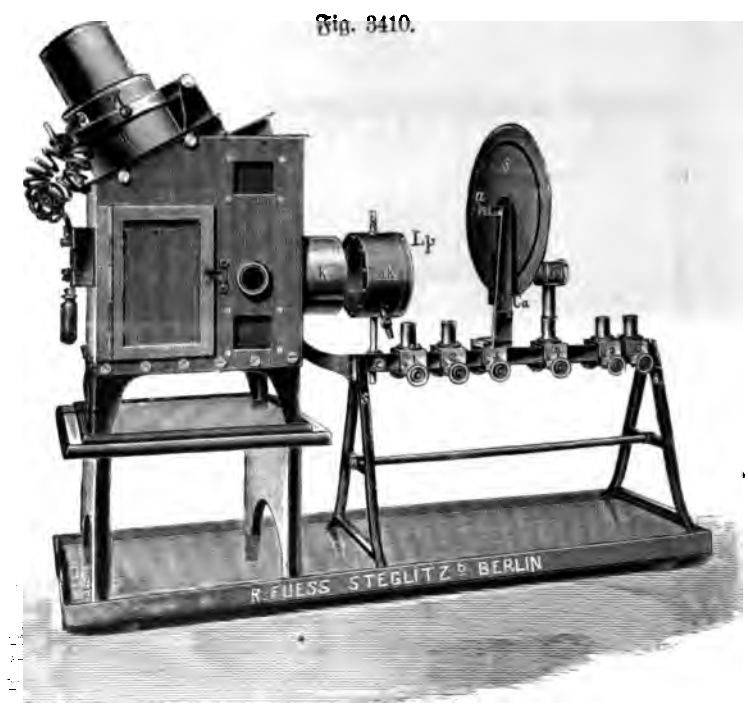


Fig. 3410.

Handl (1887) macht darauf aufmerksam, daß man den Apparat von Bergmann (Fig. 3336, S. 1301) leicht benutzen kann, um Sinuslinien zu zeichnen, indem

[1]) Einen verbesserten Apparat nach Crova, Fig. 3409, ausgestattet mit acht runden Glasscheiben, welcher ermöglicht zu demonstrieren: Die Fortpflanzung und Reflexion einer einzelnen Welle oder eines Wellenzuges, Transversalschwingungen und Interferenz zweier Wellenzüge, liefert R. König in Paris zu 400 Frcs. Ein ähnlicher Apparat nach Fig. 3410 ist zu beziehen von R. Fueß, Steglitz bei Berlin.

n etwa bei K einen Pinsel befestigt und an demselben eine bestaubte Glas-
tte gleichmäßig vorbeiführt. Auch kann der Apparat zur Erregung von Seil-
llen dienen.

381. **Seilwellen.** Das Seil, welches hierzu gebraucht werden soll, darf nicht
dick sein und muß so lang genommen werden, als es der Lehrsaal erlaubt; für 6
12 m ist ein Durchmesser von 4 bis 8 mm ausreichend; vor allem muß es sehr
ich sein. Wenn man daher nicht gerade ein passendes altes Seil erhalten kann,
muß man das gewählte neue mit einem hölzernen Hammer auf hölzerner Unter-
e im zusammengewickelten Zustande recht weich klopfen.

Das Seil wird an einer Wand angehängt und mit der Hand am anderen
de nur schlaff gehalten. Ein horizontaler Ruck mit der Hand erzeugt je nach
er Größe und Schnelligkeit an dem Seile eine verschieden lange Welle, welche
an das andere Ende fortläuft, dort reflektiert wird, wieder zur Hand zurück-
rt und dieses mit abnehmender Stärke noch ein- bis zweimal wiederholt.

Fährt man fort, die Hand hin und her zu bewegen, so gelingt es leicht, die
llenlänge am Seile so zu treffen, daß sie ein aliquoter Teil der Seillänge ist
also die reflektierten Wellen mit den neu erzeugten ursprünglichen stehende
llen bilden. Man kann das Seil auch durch ein Gewicht spannen und dann
der Hand einen Schlag darauf tun. Bei richtig gewählter Stelle und richtiger
irke des Schlages bilden sich stehende Wellen.

Anstatt des Seiles kann man auch einen Schlauch aus vulkanisiertem Kaut-
k oder eine etwa 6 m lange Drahtspirale verwenden. Letztere darf aber nicht
dünn sein wie Hosenträgerdraht, sie muß 6 bis 8 mm Durchmesser haben.

Pisko (1868) empfiehlt einen langen spiralig gewundenen Eisendrehspan, den
n leicht bis 6 m lang erhalten kann, statt eines Seiles.

Einen besonderen Seilwellenapparat beschreibt W. Volkmann[1]). Derselbe
teht im wesentlichen aus Spiralen von 1 m Länge, welche zu einem beliebig
igen Seil durch Ineinanderhaken verbunden werden können. Bei geringer Span-
ng des Seiles ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen so gering, daß
n sie direkt messen kann. Zweckmäßiger
r ist die indirekte Bestimmung aus dem
otenabstand bei stehenden Wellen.

Fig. 3411.

L. van Schaik (Z. 7, 182, 1894) demon-
iert das Fortschreiten von Querwellen mittels
in Fig. 3411 skizzierten Apparates, be-
hend aus eingekerbten Holzstäben, welche
den Schwerpunkten CC auf einer ge-
nnten Saite SS hängen und die Papierscheibchen AA tragen. Sie sind durch
chbügel DD' außerdem an einem Kautschukfaden KK befestigt. Wird letzterer
horizontaler Richtung gezerrt, so drehen sich die Stäbchen um die Unterstützungs-
nkte und man sieht die Scheibchen AA' eine Transversalwellenbewegung aus-
hren, deren Fortpflanzung durch die Reihe unter passenden Verhältnissen mehrere
kunden dauert.

[1]) In „Natur und Schule", 1, 273 bis 282 und 342 bis 350, 1902; auch Z. 16,
, 1903. Er wird geliefert von Georg Beck u. Co., Rummelsburg bei Berlin, Haupt-
aße 4, zu 30 Mk.

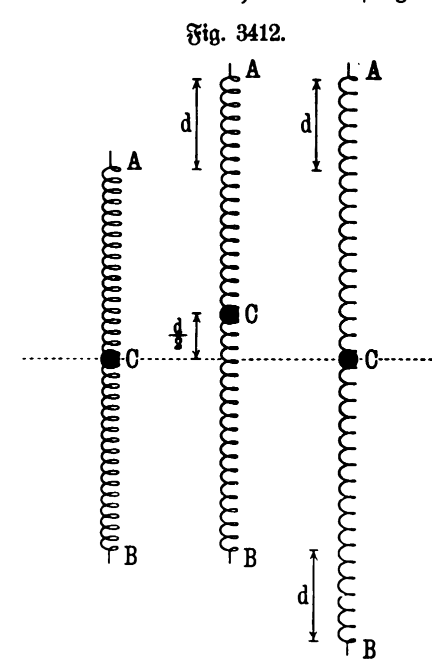
582. Reflexion der Wellen. Bei geringer Spannung des Seiles kann man deutlich beobachten, wie die Einbuchtung, die man durch einen Schlag mit einem leichten Stabe hervorgebracht hat, am befestigten Ende des Seiles reflektiert wird und als Ausbuchtung nach oben (Phasenumkehr) zurückläuft.

Die Phasenumkehr findet (nach Volkmann) nicht statt, wenn zwischen den Endhaken und dem Seile ein 1 m langer Zwirnsfaden eingeschaltet wird.

Besteht das Seil aus einigen Metern dicker Spirale, an welche sich einige Meter dünner Spirale anschließen, so sieht man an der Verbindungsstelle die Einbuchtung sich teilen in einen weitergehenden und einen zurückgeworfenen Teil, falls die Welle am Ende des dicken Stückes erregt wurde. Im entgegengesetzten Falle zeigt der zurückgeworfene Teil Phasenumkehr.

Volkmann empfiehlt folgenden Versuch: Man schlägt rasch hintereinander dreimal in der Nähe des Anfangs leicht auf das Seil, es erscheint ein Zug von drei Wellen, der ganz ebenso zurückgeworfen wird, wie eine einzelne Welle. Schlägt man andauernd in gleichmäßigem richtigem Takt, so bildet sich die stehende Welle aus als die Störungsfigur, die der Überlagerung der reflektierten Wellen über die erst ankommenden ihre Entstehung verdankt. Der Umstand, daß bei dem vorigen Versuch die Welle sich wieder unverändert aus dieser Störungsfigur herausschälte, beweist, daß sich die beiden Wellen einfach übereinander gelagert haben.

Fig. 3412.

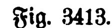


Eine Wellenmaschine, welche gestattet, die einzelnen Stadien der Bewegung bei der Reflexion in aller Ruhe genau zu verfolgen, beschreibt W. Schmidt[1]).

Die Verschiebungen werden dabei durch zwei beim Drehen einer Kurbel vermittelst Trieb- und Zahnstange entgegengesetzt bewegte Schablonen hervorgerufen, welche auf die Enden von Stahldrahtspiralen wirken, in deren Mitte Kügelchen befestigt sind, die die schwingenden Teilchen darstellen. Die Fig. 3412 erläutert, wie auf solche Weise Superposition der Verschiebungen erzielt wird. Wird das Ende *B* der Spirale wie bei der mittleren Figur festgehalten, *A* dagegen gezerrt, so verschiebt sich *C* in gleicher Richtung wie *A*, allerdings nur halb so viel. Würde auch *B* in gleicher Richtung verschoben, so würden sich die beiden Verschiebungen addieren. Wird aber *B* wie in der Figur rechts um gleich viel entgegengesetzt verschoben, so bleibt *C* in der Anfangsstellung, die beiden Verschiebungen heben sich auf. Die Enden *A* und *B* sind an dem Apparat an Hülsen befestigt, die auf Stahldrähten gleiten können und durch die aus Holzleisten hergestellten Schablonen mehr oder weniger stark aus ihrer Anfangsstellung verdrängt werden. Fig. 3413 zeigt den Apparat vorgerichtet zur Demonstration der

[1]) W. Schmidt, Verh. d. d. phys. Ges. 6, 249, 1904. Der Apparat ist zu beziehen vom Mechaniker W. Schmidt in Gießen zu 120 Mk.

Reflexion einer Seilwelle am festen Ende, Fig. 3414 zur Demonstration der Grundschwingung des inmitten festgeklemmten Stabes.


Fig. 3413.

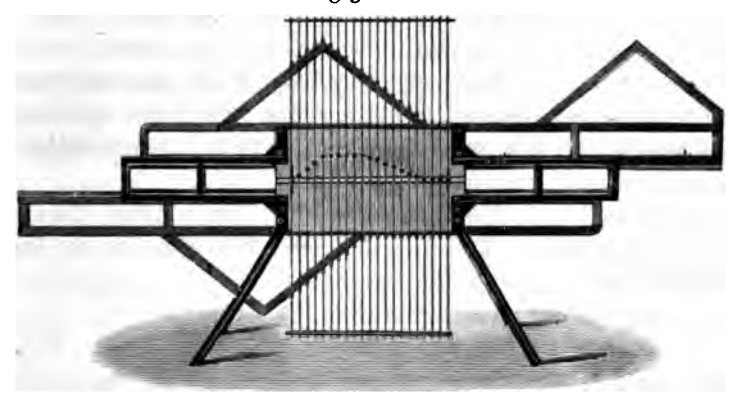
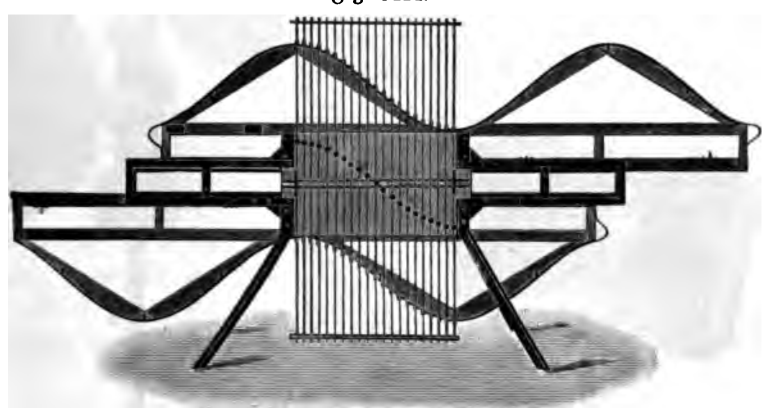


Fig. 3414.



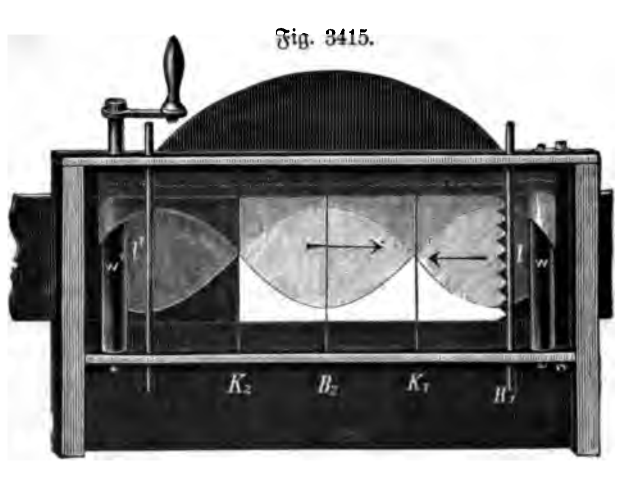


Fig. 3415.

Man kann mit dem Apparat auch die Übereinanderlagerung von zwei Sinuslinien mit verschiedener Periode zeigen.

583. Stehende Wellen. Raschig (Z. **10**, 14, 1897) benutzt zur Erklärung der Bildung stehender Wellen, sowie zur Projektion der sich überdeckenden, ankommenden und reflektierten Wellen den Apparat Fig. 3415 (E, 50). Die Summation der Wellen wird durch die Transparenz der auf durchsichtig über zwei Walzen geführte Pauseleinwand aufgetragenen Wellenzüge für die Anschauung direkt vermittelt.

H. Borgesius (Z. 12, 255, 1899) beschreibt neue Projektionswellenmaschinen zur Demonstration der Interferenz von Wellen, insbesondere der Entstehung stehender Wellen. Den einfachsten Apparat stellt Fig. 3416 dar. Die Lichtstrahlen gehen zunächst durch die Scheibe G_1 mit kreisförmigem Spalt, dann durch den geraden Spalt S und durch den wellenförmigen Spalt der Scheibe G. Man sieht dann auf dem Schirme eine fortschreitende Welle. Dreht man den Spalt um, so schreitet die Welle in entgegengesetzter Richtung fort. Verwendet man statt G_1 eine zweite Wellenscheibe, so sieht man eine stehende Welle. Zweckmäßiger ist die in Fig. 3417 dargestellte Modifikation des Apparates.

Giltay (Z. 16, 193, 1903) empfiehlt, wie schon früher Quincke[1]), die Beiziehung des Stroboskops. Er empfiehlt ferner, den Übergang der laufenden in stehende Wellen mittels des Kinematographen aufzunehmen und zu demonstrieren, wobei sich die Bildung der stehenden Wellen gut verfolgen läßt, da die Aufnahmen mit jeder gewünschten Verzögerung projiciert werden können.

Zur Demonstration der stehenden Wellen hängt Giltay einen mit Sand gefüllten Kautschukschlauch vertikal auf unter Benutzung einer besonderen Aufzugvorrichtung. Die Anordnung hat aber den Nachteil, daß die Spannung in den oberen Teilen des Schlauches, demgemäß auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen größer ist als in den unteren. Er mißt damit zunächst die für einen Hin- und Hergang einer Welle erforderliche Zeit und zeigt, daß dieselbe gleich ist der Zeit, während welcher der Schlauch als Ganzes seine Schwingungen ausführt.

Fig. 3416.



Fig. 3417.

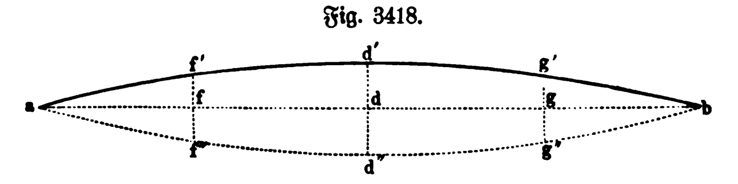


384. Gespannte Saiten. Wenn eine gespannte Saite auf irgend eine Weise, sei es durch Anschlag, durch Zupfen oder durch Streichen mit dem Violinbogen aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht wird, so gerät sie in den Zustand stehender Schwingungen. Der einfachste Fall ist der, daß die Saite der ganzen Länge nach

[1]) Ernecke liefert Wellenbilder nach Quincke mit stroboskopischem Cylinder von Metall zu 16,50 Mk.

schwingt, wie es in Fig. 3418 dargestellt ist. Alle Teilchen befinden sich gleichzeitig auf der einen und dann wieder auf der anderen Seite der Gleichgewichtslage, sie erreichen gleichzeitig das Maximum der Entfernung von der Gleichgewichtslage auf der einen Seite, gehen dann gleichzeitig durch die Gleichgewichtslage hindurch und kommen hierauf gleichzeitig wieder an der Grenze ihrer Bahnen auf der anderen Seite an. Dieser Schwingungszustand einer gespannten Saite wird unter anderem hervorgebracht, wenn man sie nahe an einem ihrer Endpunkte mit einem Violinbogen streicht; die Saite führt alsdann ihre Grundschwingung aus.

Fig. 3418.



Ich benutze zu diesen Versuchen die schon mehrfach erwähnte 3,5 m lange Stahldrahtspirale. Die Schwingungsdauer ergibt sich aus der Formel $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{f}}$, worin aber m nicht einfach Gewicht der Saite dividiert durch g bedeutet, sondern nur $4/\pi^2$ dieses Wertes, da nicht alle Massenteilchen der Saite in gleicher Weise an den Schwingungen beteiligt sind. f ist die Kraft, welche den Ausschlag, 1 m, hervorbringt, wie auf S. 1315 erklärt wurde.

Fig. 3419.

Die Kraft k, welche den Ausschlag α (Fig. 3419) hervorruft, ist also $= f.\alpha$ oder umgekehrt $f = k/\alpha$. Nun ergibt sich aus der Ähnlichkeit der schraffierten Dreiecke, von welchen das untere einen Teil des Kräfteparallelogramms darstellt,

$$k/2 : s = \alpha : l/2,$$

wenn s die Spannung der Feder und l deren Länge bedeutet, somit $f = 4.s/l$ und $T = 2\pi\sqrt{\frac{ml}{4s}}$. Bedeutet μ die Masse der Längeneinheit der Seite, also $\mu.l$ ihre ganze Masse, so ist $m = 4/\pi^2 \times \mu.l$ also

$$T = 2l\sqrt{\frac{\mu}{s}} \text{ Sekunden.}$$

Die Spannung s der Feder wird dadurch gemessen, daß man die Feder zunächst mit 5 kg belastet, wodurch eine Verlängerung von m hervorgebracht wird. Nun wird das Ende der Feder im verlängerten Zustande an einem schweren Stativ befestigt, welches gerade auf die richtige Höhe eingestellt wurde und der Stabilität wegen noch mit einem schweren Gewichtsstein belastet wird.

Dadurch ändert sich natürlich die Spannung nicht. Das Gewicht der Feder beträgt 2,3 kg, somit die Masse von 1 m $\mu = 2{,}3/3{,}5.g$, also

$$T = 2.3{,}5\sqrt{\frac{2{,}3}{3{,}5 . 5 . 9{,}81}} = 0{,}81 \text{ Sekunden,}$$

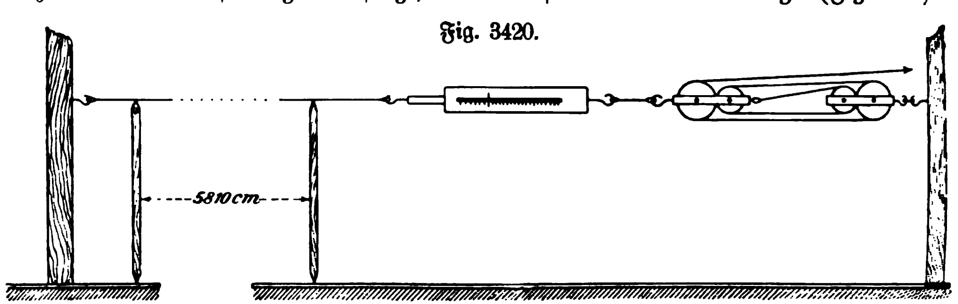
oder die Schwingungszahl $n = \frac{1}{T} = \frac{100}{81}$, so daß in 8 Sekunden nahezu zehn

Schwingungen erfolgen müssen, wie man leicht mit dem Sekundenschläger konstatieren kann.

Nennt man q den Querschnitt einer Saite, d deren spezifisches Gewicht und l die Länge, so ist $\mu = q.d/g$, somit ihre Schwingungsdauer $T = 2l\sqrt{\frac{q.d}{s.g}}$. Die Schwingungszahl einer Saite steht also in umgekehrtem Verhältnisse mit der Länge und der Dicke, sowie mit der Wurzel aus dem spezifischen Gewichte der Saite, dagegen in geradem Verhältnisse mit der Wurzel aus der Spannung.

Grimsehl (Z. 15, 200, 1902) verwendet zur Demonstration der Saitenschwingungen einen 62 m langen, 0,93 mm dicken Klaviersaitendraht, welcher unter Zwischenschaltung einer Federwage mittels eines Flaschenzuges bis zu einer Spannung von 50 kg horizontal 1 m hoch über den Fußboden ausgespannt wird und an zwei Stellen auf Stegen aufliegt, deren Abstand 5810 cm beträgt (Fig. 3420).

Fig. 3420.



Man kann zunächst zeigen, daß der von einer Querwelle zurückgelegte Weg der Quadratwurzel aus der Spannung proportional ist. Beispielsweise wurde bei einer Spannung von 5 kg, wenn man in der Nähe des einen Steges auf den Draht einen kurzen Schlag mit dem Finger gibt, gefunden, daß die entstehende Welle in einer Minute genau 50 Hin- und Rückgänge macht. Bei einer Spannung von 10 kg ergaben sich 141. Wenn man jedesmal, wenn die Welle ihren Weg zum zweitenmal beginnt, der Saite einen erneuten Schlag erteilt, so gerät die Saite in gleichmäßige Grundschwingungen. Man ersieht also leicht, daß die Saite in derselben Zeit als Ganzes schwingend eine stehende Schwingung ausführt, in welcher eine fortschreitende Welle den Hin- und Rückgang über die Saite zurücklegt, also ist die Wellenlänge gleich der doppelten Länge der Saite.

Fig. 3421.



Schwedoff benutzt eine elektrische Vorrichtung (Figur 3421 Lb, 60). Mit Hilfe eines Unterbrechers, zu dessen Betrieb 2 Volt und etwa 1/2 Amp. erforderlich sind, wird eine 1 m lange weiße Schnur in stehende Schwingungen versetzt. Der Unterbrecher kann um 90° gedreht werden, so daß die elastische Feder und die damit verbundene Schnur transversal oder longitudinal zur Längsrichtung der Schnur sich bewegen kann. In jeder

Zwischenstellung erfolgen aus diesen beiden Schwingungsarten kombinierte Schwingungen. Mit Hilfe einer am rechten Ende des Apparates angebrachten Schraube läßt sich die Schnur mehr oder weniger spannen und man erhält je nach der Spannung 1, 2, 3 bis 8 Schwingungsbäuche nebst der entsprechenden Anzahl Knoten. Bäuche und Knoten sind deutlich ausgeprägt und vor dem schwarzen Hintergrunde gut sichtbar. Dabei schwingt die Schnur entweder in einer Ebene oder sie führt elliptische oder kreisförmige Bewegungen aus, je nach dem Verhältnis der Schwingungen der elastischen Feder zu denjenigen der Schnur.

Adolf (Z. 8, 313, 1895) bringt die Knotenpunkte schwingender Saiten zur Anschauung, indem er mit einer elektrischen Lampe ein Schattenbild derselben auf einem weißen Schirm entwirft.

585. Wellenlänge und Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Die Wellenlänge ist das doppelte des Knotenabstandes (vgl. § 586) und ihr Produkt mit der Schwingungszahl pro Sekunde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

Während nämlich ein Teilchen eine Oscillation vollendet, schreitet die Welle um eine Wellenlänge voran.

Beträgt also die Schwingungsdauer T Sekunden und die Wellenlänge λ Meter, so ist hiernach die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung v:

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Beträgt die Zahl der Schwingungen in einer Sekunde n, so ist $T = \frac{1}{n}$ und somit $v = n.\lambda$.

Die Formel läßt sich auch direkt erhalten, indem man sich vorstellt, daß auf der in einer Sekunde zurückgelegten Strecke v notwendig n Wellen liegen müssen, deren jede die Länge λ hat.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v läßt sich also leicht finden, wenn Knotenabstand und Schwingungszahl bekannt sind. Für die betrachtete Grundschwingung ist ersterer gleich der Länge der Saite.

Beispielsweise ergibt sich für die oben benutzte Feder $v = 2.3{,}5/0{,}81 = 8{,}6$ m pro Sekunde.

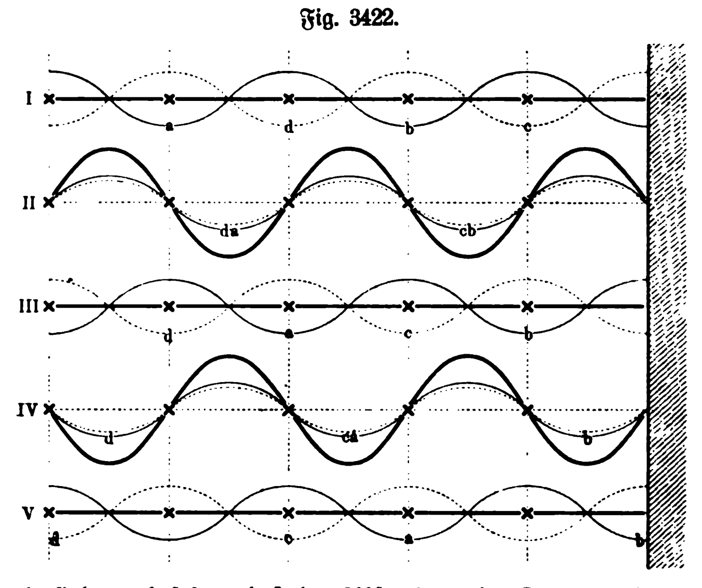
586. Oberschwingungen. Pflanzt sich nicht eine einzelne Welle, sondern ein endloser Wellenzug längs des Seiles fort, so kommt vom Ende des Seiles ein genau gleich beschaffener Wellenzug mit gleicher Geschwindigkeit zurück, welcher gerade umgekehrte Lage hat wie der erste, so daß also jedes Teilchen von zwei Wellenbewegungen erfaßt wird, die sich bald in ihren Wirkungen verstärken, bald schwächen oder völlig aufheben. (Vgl. § 582).

Wäre im bestimmten Momente die gegenseitige Lage der beiden Wellenzüge so, wie in Fig. 3422_{I} durch die voll ausgezogene und durch die punktiert gezeichnete Wellenlinie angedeutet ist, so wären an allen Stellen die Bewegungen gleich und entgegengesetzt, würden sich somit aufheben, das Seil würde sich also gar nicht bewegen, sondern, wie die dicke schwarze Linie andeutet, seine gerade Form behalten, indes nur für einen Moment.

Hat sich die voll ausgezogene ankommende Welle um $^1/_4$ der Wellenlänge verschoben, so hat der reflektierte Wellenzug die in Fig. 3422_{II} gezeichnete Lage, d. h. er fällt vollständig mit dem ankommenden zusammen. Da nun alle Teilchen des

Seiles einen doppelt so starken Antrieb bekommen, wie bei dem einfachen Wellenzuge, so bildet sich ein Wellenzug von doppelt so großer Amplitude. Eine Viertel-Oscillationsdauer später heben sich die beiden Wellenzüge gemäß Fig. 3422_{III} wieder auf, nach abermaliger Verschiebung um eine Viertel-Wellenlänge tritt wieder Koinzidenz und somit Verdoppelung der Amplitude ein, wie Fig. 3422_{IV} zeigt. Beachtet man die durch Sternchen ausgezeichneten Punkte, so erkennt man ohne weiteres, daß dieselben jederzeit in Ruhe bleiben, während die dazwischen liegenden Punkte auf- und abschwingen. Erstere heißen **Knotenpunkte**, die mitten zwischen ihnen liegenden Punkte, für welche die Schwingungsweite (Amplitude) am größten ist, **Bäuche**.

Fig. 3422.

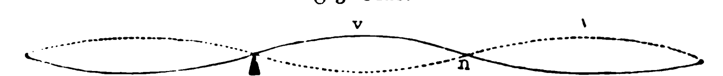


Man übersieht auch sofort, daß der Abstand zweier Knotenpunkte d die Hälfte der Wellenlänge λ ist, oder

$$\lambda = 2d.$$

Solche Abteilungen lassen sich an gespannten Saiten unter anderem dadurch hervorbringen, daß man an geeigneter Stelle einen Steg anbringt, auf welchem

Fig. 3423.



die Saite lose aufliegt. Setzt man z. B., wie Fig. 3423 erläutert, den Steg so, daß durch ihn die ganze Saitenlänge in zwei Teile geteilt wird, welche sich verhalten, wie 1 zu 2, daß also das kleinere Stück $^1/_3$, das größere $^2/_3$ der ganzen Saitenlänge beträgt, so entsteht, wenn man das kleinere Stück mit dem Violinbogen streicht, in der Mitte des längeren Saitenstückes bei n ein Schwingungsknoten, während sich ein Maximum bei v und ein zweites bei v' bildet.

Die Knoten lassen sich dadurch nachweisen, daß man an verschiedenen Stellen der Saite leichte Papierreiterchen aufsetzt, welche beim Anspielen der Saite auf den Knotenpunkten sitzen bleiben, während sie sonst überall abgeworfen werden.

Wenn man den Steg so setzt, daß durch ihn die Saite in zwei Teile geteilt wird, von denen der kleinere $^1/_4$ der ganzen Länge der Saite ist, so bilden sich,

wenn man diesen kleineren Teil mit dem Violinbogen anstreicht, im größeren zwei Knoten und drei Bäuche.

Die Pendel-Formel kann auch wie für Grundschwingungen auf den Fall angewendet werden, wenn sich das Seil in mehrere schwingende Abteilungen abteilt (Fig. 3423), da sie für jede dieser Abteilungen gilt.

Um den Knotenabstand, d. h. die halbe Wellenlänge, zu bestimmen, benutze ich zwei stabförmige Ständer, welche während der Schwingungen des horizontal durch das ganze Auditorium gespannten Seils an zwei Knotenpunkte herangeschoben werden. Man kann nachher in Ruhe ihren Abstand ermitteln. Zur Erregung der Schwingungen benutze ich ebenso wie G. S. Moller (1889) eine rasch umlaufende Kurbel mit sehr kurzem Arm, welche mit einer Transmission mit variabler Tourenzahl in raschen Umlauf gesetzt wird.

Die ganze Länge des Seils (weiße geklöppelte Seidenschnur) beträgt 13,5 m, das Gewicht 0,1 kg, das spannende Gewicht 0,3 kg, der Knotenabstand 2,4 m. Somit muß sein:

$$T = 2 \,.\, 2{,}4 \sqrt{\frac{0{,}1}{9{,}81 \,.\, 13{,}5 \,.\, 0{,}3}} = 0{,}25 \text{ Sekunden}$$

oder $n = \frac{100}{25}$, d. h. die Kurbel muß in 25 Sekunden 100 Umläufe machen, was leicht mittels des Tourenzählers, der nach 100 Umdrehungen einen Glockenschlag ertönen läßt, nachgewiesen werden kann.

Ferner ergibt sich nach § 585: $v = \frac{2 \,.\, 2{,}4}{0{,}25} = 19{,}2$ m pro Sekunde[1]).

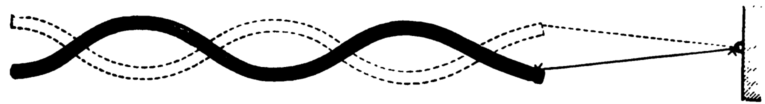
Handl (1887) befestigt das eine Ende eines dünnen, etwa 4 m langen Kautschukschlauches an einem Haken in der Wand, das andere an einem geradlinig geführten Schlitten, welcher mittels einer Kurbel hin und her geschoben wird.

Young erzielte schönen Effekt durch Benutzung von flachem, poliertem Silberdraht und Beleuchtung desselben mittels elektrischen Lichtes, Tyndall gebrauchte einen galvanisch glühenden Platindraht (vgl. § 584).

Man kann schon hier darauf hinweisen, daß Grundschwingung und Oberschwingungen bei einer Saite gleichzeitig auftreten können.

587. Feste und freie Enden. In der eben beschriebenen Weise bilden sich die stehenden Wellen, wenn die Seilenden fest sind. Ist dies nicht der Fall, sind

Fig. 3424.



die Enden vielmehr frei beweglich, so wird die Bewegungsrichtung der Teilchen bei der Reflexion nicht in die entgegengesetzte verwandelt, der reflektierte Wellenzug ist also nicht umgelegt zu denken. Infolgedessen werden die Seilenden nicht Knotenpunkte, sondern Schwingungsbäuche. Die Knotenpunkte liegen eine Viertel-Wellenlänge vom Ende entfernt. Man kann sich davon überzeugen, wenn man das Seil (besser einen starkwandigen sog. Luftpumpenschlauch), wie Fig. 3424 zeigt, nicht direkt an der Wand befestigt, sondern mittels einer langen dünnen Schnur.

[1]) Über direkte und indirekte Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Wellenbewegung siehe Elsässer, Z. 16, 20, 1903.

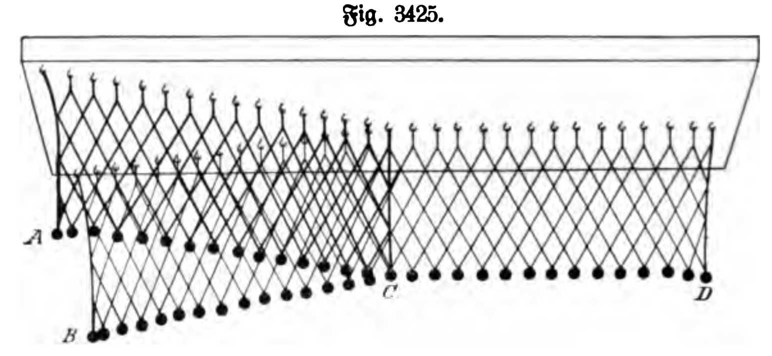
588. Zusammengesetzte Seile. Um die Abhängigkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit von dem Material zu zeigen, insbesondere die Verschiedenheit der Wellenlängen in den Teilen eines aus verschiedenartigen Stücken zusammengesetzten Seils, setzt Volkmann 2 m schwerer und 2 m leichter Spirale zusammen bei ziemlich geringer Spannung und erzeugt eine stehende Welle mit zwei Knoten. Die Verbindungsstelle fällt dabei, ohne Störung zu verursachen, in den mittleren Schwingungsbauch. Zwei Schüler projicieren mit Loten und Kreide die beiden Knotenpunkte und die beiden Endpunkte auf den Fußboden. Die Ausmessung der beiden äußeren Schwingungsbäuche und Division der erhaltenen Zahlen durcheinander, sowie die Wägung je einer dicken und dünnen Spirale ergibt quantitativ den Einfluß des Seilgewichtes auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

Ist eine gleichmäßige Spirale zwischen zwei festen Enden ausgespannt, so hat die auf ihr erregte Welle an beiden Enden Schwingungsknoten. Schaltet man an einem Ende einen langen Zwirnsfaden ein, so entsteht hier ein Schwingungsbauch am Ende.

Nimmt man statt der dicken Spiralen beim erstbeschriebenen Versuch dünne Spiralen doppelt oder dreifach und erzeugt eine stehende Welle mit zwei Knoten, so ist klar, daß die Spannung der einfachen Spirale zwei- oder dreimal so groß ist als die der doppelten oder dreifachen. Demgemäß ergibt sich die Wellenlänge darauf um $\sqrt{2}$ oder $\sqrt{3}$ mal so groß als auf dieser.

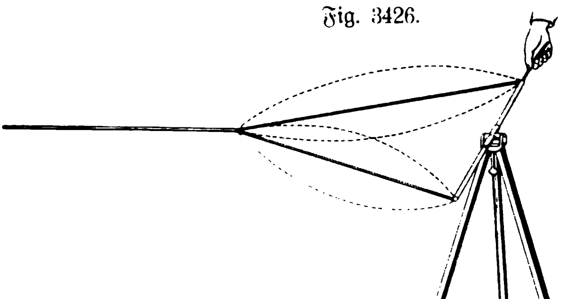
589. Interferenz. v. Rostowzew (Z. 16, 274, 1903) demonstriert die Interferenz der Wellen nach dem bereits oben S. 1328 besprochenen Prinzip, indem

Fig. 3425.



er, wie Fig. 3425 zeigt, zwei mit Bleikugeln beschwerte Netze AC und BC in ein Netz CD zusammenlaufen läßt. Werden die Kügelchen AB in Schwingungen mit gleichen Phasen versetzt, so schwingt der Teil CD mit vergrößerter Amplitude. Bringt man aber die Kügelchen AB in Schwingungen mit entgegengesetzten Phasen, so bleibt der Teil CD beinahe ruhig.

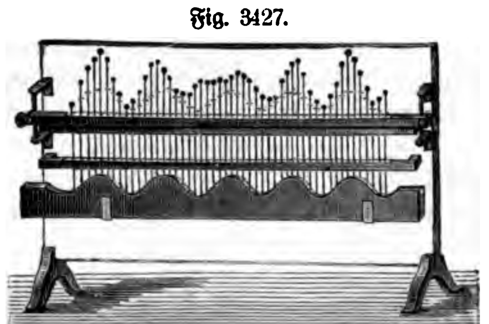
Fig. 3426.



Volkmann demonstriert die gegenseitige Vernichtung zweier gleichlaufender Wellen mit entgegengesetzter Phase mittels des Apparates Fig. 3426. Der Hebel wird durch eine kurze Spirale, welche schräg nach hinten gespannt gehalten wird, in

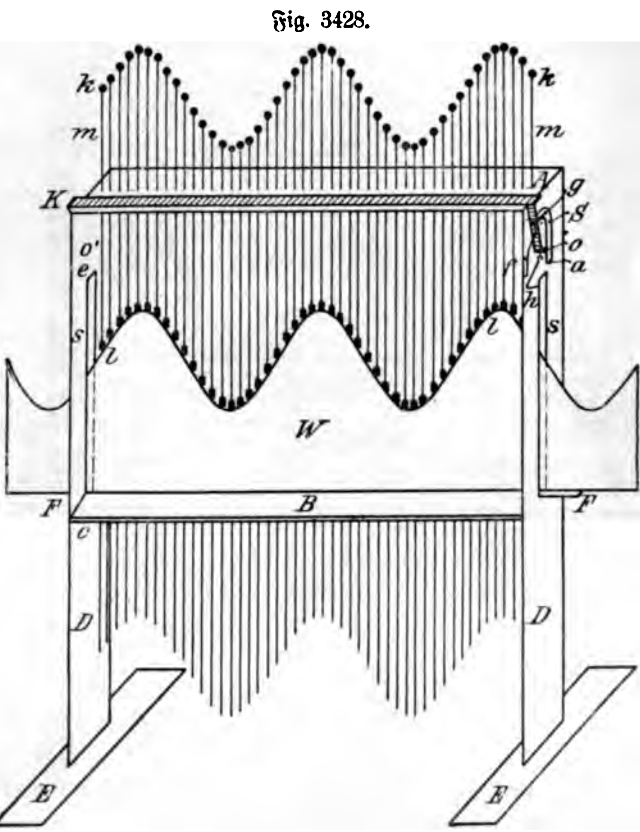
gische Bewegung von sehr geringer Amplitude (wenige Millimeter!) versetzt, die nnung der Spiralen so groß gewählt, daß kein merklicher Durchhang zu er= ten ist. Die Hauptsache ist genau metrische Aufstellung mit genau hartigen Spiralen und Einhalten richtigen Schwingungstaktes. Diesen t findet man, indem man den wingungshebel durch einige Keile stellt, den zum Knoten bestimmten belungspunkt festhält und die Spirale h Zupfen erregt. Sie gibt nun richtigen Takt an[1]).

Fig. 3427.



Bequeme Wellen= schinen zur Demon= tion der gegenseitigen nichtung wie auch Ver= ckung zweier Wellen Eisenlohr konstru= (Fig. 3427 E, 50).

Fig. 3428.

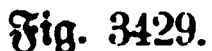


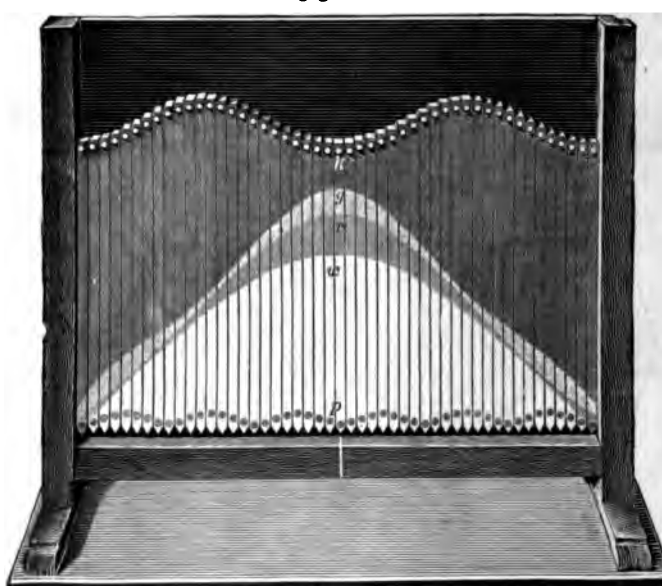
590. Zusammen= etzte Wellen. Da im emeinen, wie bereits edeutet, eine Saite hzeitig Grund= und rschwingungen aus= t, ist die Wellen= n nicht eine einfache Slinie, sondern eine lizierte Kurve, wie durch Superposition jenen Schwingungen prechenden Sinus= n erhalten wird[2]). Einen Apparat zur mmensetzung be= g vieler Wellen kon= erte Eisenlohr nach 3427. Kann (Z. 15, 1902) läßt die Drähte, welche die Kugeln tragen, an der aus Karton ge= ittenen Wellenschablone *W* vorbeigehen, und mittels Anschlägen auf dieser auf= n. Die Anschläge sind an den Stäbchen verschiebbar (Fig. 3428).

[1]) Vgl. auch Puluj, Z. 2, 137, 1889. — [2]) A. Toepler, Mitt. d. naturw. Ver. in ermark (1872), führte den Nachweis, daß Funktionen, welche nach Fourier in Reihen h die Sinus und Cosinus ganzer Vielfacher entwickelt werden können, in zahlreichen en auch darstellbar sind durch andere periodische Funktionen, daß insbesondere eine iche Sinusbewegung auch zusammengesetzt gedacht werden kann aus übereinander ge= rten verwickelteren Schwingungsformen.

Pfaundler konstruierte (1888) einen Wellenapparat, der sehr viele Wellenkombinationen zu demonstrieren gestattet. Ich gebe einzelne Stellen aus der Gebrauchsanweisung wörtlich wieder:

Der Apparat (Fig. 3429) besteht aus einem Holzgestelle mit vertikaler, schwarz gefärbter Rückwand, vor welcher 49 Holzstäbchen mit quadratischem Querschnitte in senkrechter Lage nahe aneinander stehend auf und ab bewegt werden können. In der Anfangslage stehen die unteren Kanten dieser Stäbchen alle auf einer horizontalen Leiste auf, über welche sie nach vorn um die halbe Dicke hervorragen. Die oberen Enden der Stäbchen tragen weiße Knöpfe (k), welche bei dieser Lage eine doppelte Sinuswelle darstellen. Die Führung der Stäbchen ist durch ebenso vertikale Schlitze in der Rückwand bewerkstelligt, in welche von jedem Stäbchen zwei Metallstifte hineinragen, die durch Schraubenmuttern an der Hinterseite vor dem Hervorfallen gesichert sind. Die Vorderseite der Stäbchen ist im oberen Teile geschwärzt, im mittleren Teile sind mehrere Kurven aufgetragen und durch Färbung der dazwischen liegenden Flächen weithin sichtbar gemacht. Gegen das untere Ende endlich ist noch eine rot gefärbte Punktreihe (p) in Form einer Welle geringerer Wellenlänge aufgetragen.


Fig. 3429.



Die auf den Stäbchen in der Anfangslage (Fig. 3429) ersichtlichen Wellen sind folgende:

1. Eine doppelte Welle, gebildet durch die weißen Knöpfe (k),
   von der Wellenläge $\lambda = 36$ cm und der Amplitude $a = 3$ cm.
2. Eine weiß bemalte halbe Welle (w),
   von der Wellenlänge $\lambda = 144$ cm und der Amplitude $A = 25$ cm.
3. Eine rot punktierte sechsfache Welle (p),
   von der Wellenlänge $\lambda = 12$ cm und der Amplitude $\alpha = 1$ cm.
4. Eine rot bemalte Kurve (r) } beide von unten zu besprechender Wellenform.
5. Eine gelb bemalte Kurve (g) }

Um die Zusammensetzung der Wellensysteme zu bewerkstelligen, wird dann, wie Fig. 3430 zeigt, eine der sieben dem Apparate beigegebenen Wellenschablonen aus Holz unter den Stäbchen eingeschoben und durch Hin- und Herziehen derselben der gewünschte Gangunterschied hervorgebracht.

Diese Wellenschablonen sind teils weiß, teils rot, gelb oder orangefarbig bemalt und entsprechen Wellensystemen von verschiedener Wellenlänge und Amplitude.

Unter den verschiedenen möglichen Kombinationen von je zwei Wellen sind besonders hervorzuheben:

Eine Welle, welche durch die Gleichung

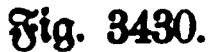
$$y = a \sin x + a \sin (x + \vartheta)$$

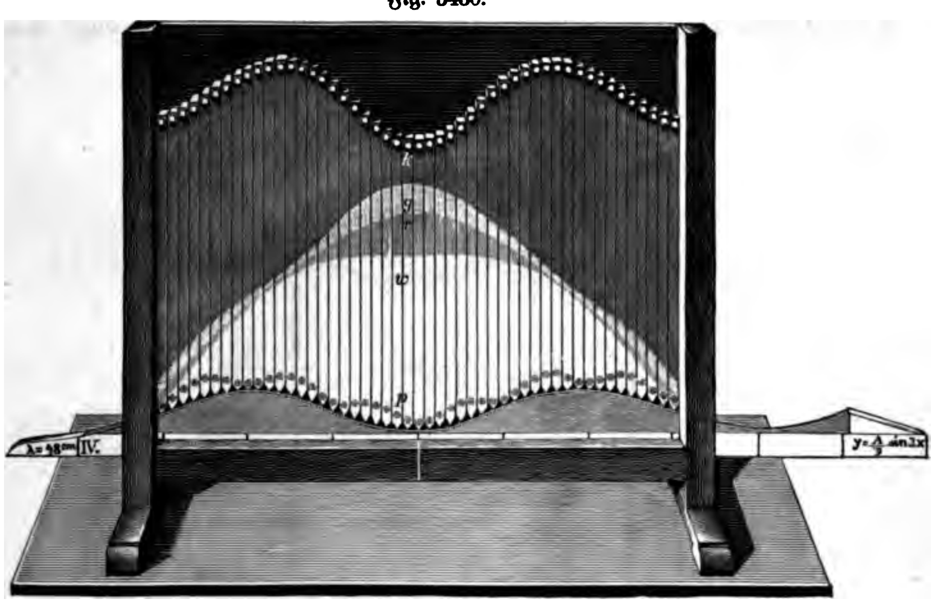
dargestellt ist. Durch diese wird die Aufhebung zweier gleichen Wellen oder die Verdoppelung ihrer Amplituden durch Interferenz demonstriert (Unisono).

Eine Welle, welche durch die Gleichung

$$y = a \sin x + \frac{1}{2} a \sin \left(\frac{3}{2} x + \vartheta\right)$$

dargestellt ist. Diese entspricht der Kombination von Grundschwingung und Quinte mit halber Amplitude der letzteren.


Fig. 3430.



Eine Welle, welche durch die Gleichung

$$y = a \sin x + \frac{1}{2} a \sin (2 x + \vartheta)$$

dargestellt wird, entsprechend der Kombination von Grundschwingung und Oktave (von halber Amplitude).

Diese drei Wellen erscheinen an der weißen Knopfreihe. (Es wird sich beim Unterricht empfehlen, den nicht benutzten Teil des Apparates vorläufig zu verhüllen.)

Die nun folgende Kombination erscheint in der roten Punktreihe:

Eine Welle, dargestellt durch die Gleichung

$$y = a \sin x + a \sin \left(\frac{10}{9} x + \vartheta\right),$$

entsprechend dem Intervall $^{10}/_{9}$ (einer ganzen Schwingung), zugleich zur Demonstration der Stöße (Schwebungen) geeignet.

Zu sämtlichen bisherigen Kombinationen dienen die weiß bemalten Wellenschablonen. Zu der nun folgenden Reihe von Experimenten gehören die rot, gelb

und orange bemalten Holzschablonen und überdies zwei Schablonen aus Pappe. Es handelt sich dabei um successive Zusammensetzung der den ungeraden Obertönen entsprechenden Wellen mit der großen Halbwelle, welche durch die weiße Fläche auf den Stäbchen dargestellt ist.

Man schiebt zunächst die rote Schablone IV ein; kommt dabei das Wellental in die Mitte zu stehen, so entsteht die Fig. 3430, entsprechend der Gleichung:

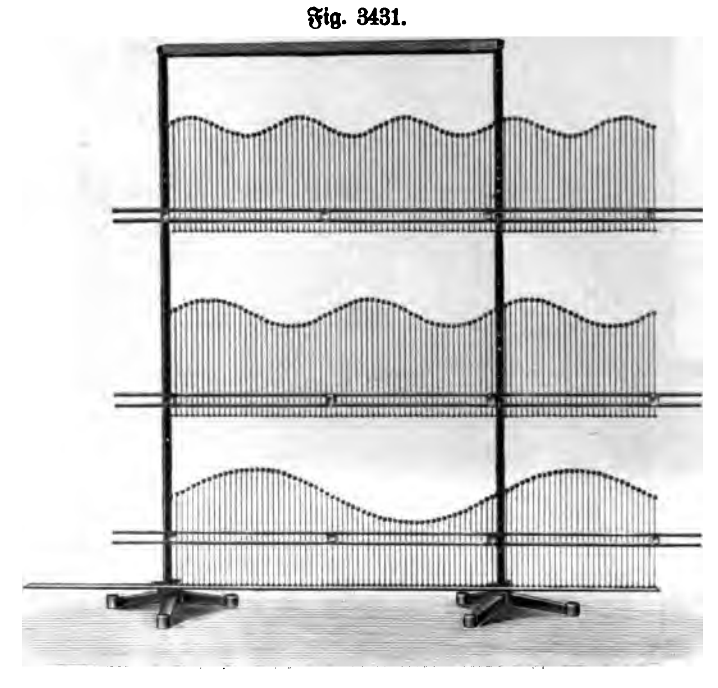
$$y = A \sin x + \frac{1}{9} A \sin 3x.$$

Schiebt man aber den Wellenberg in die Mitte, so entsteht die Welle:

$$y = A \sin x - \frac{1}{9} A \sin 3x,$$

welche sich schon etwas der Form eines gleichschenkeligen Dreiecks nähert. Diese nämliche Welle ist auf einer Pappschablone kopiert, wie man sich überzeugt, indem

Fig. 3431.



man die letztere vor die weiße Fläche hinhält. Jetzt zieht man die Holzschablone heraus und zeigt, daß dieselbe Welle in der Anfangsstellung des Apparates rot aufgemalt ist (r in Fig. 3429). Nun gibt diese rote Welle den Ausgang der Kombination mit der gelben Holzschablone V. Dadurch entsteht, wenn wiederum ein Wellenberg derselben in die Mitte zu stehen kommt, die dreifach kombinierte Welle von der Gleichung:

$$y = A \sin x - \frac{1}{9} A \sin 3x + \frac{1}{25} A \sin 5x;$$

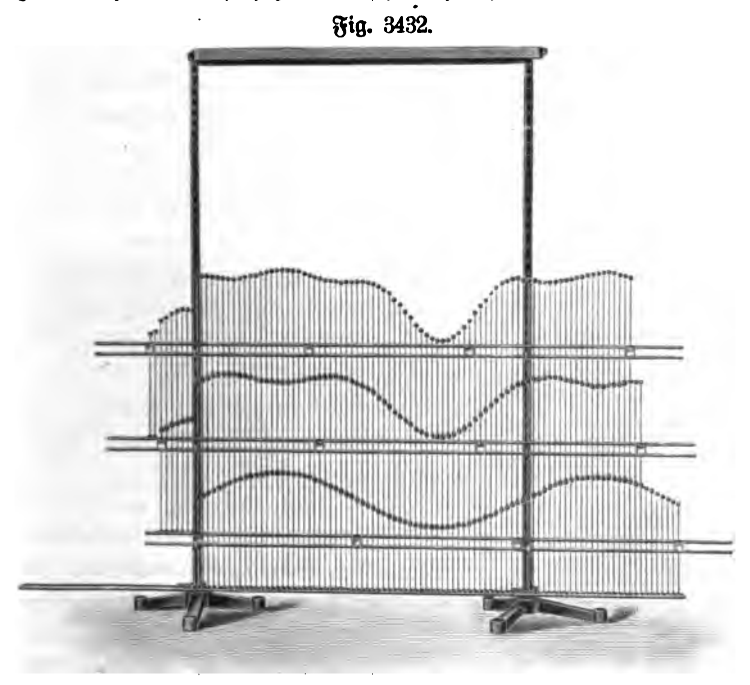
diese, jetzt durch die rote Fläche formierte Welle, welche sich noch mehr der Dreiecksform nähert, ist wiederum auf einer Pappschablone kopiert, wie man durch Vorsetzen der letzteren zeigt. Nach dem Herausziehen der Holzschablone erscheint dieselbe Welle gelb bemalt auf dem in der Anfangslage befindlichen Apparate (g in

ig. 3429). Endlich wird noch die orangefarbige Holzschablone eingeschoben. Es rmiert sich, sobald wieder ein Wellenberg in die Mitte zu stehen kommt, die vierch kombinierte Welle entsprechend der Gleichung:

$$y = A \sin x - \frac{1}{9} A \sin 3x + \frac{1}{25} A \sin 5x - \frac{1}{49} A \sin 7x,$$

elche noch mehr der Dreiecksform sich nähert, als die früheren. Es ist dann leicht ausibel zu machen, daß durch Fortsetzung des Verfahrens sich die noch abgerundete uppe in der Mitte immer mehr zuspitzen muß, da immer schmälere Wellenberge n sich übereinander häufen werden. Damit ist es also ermöglicht, die aus dem ourierschen Theoreme für die Form einer schwingenden Saite abzuleitenden lgerungen durch den Versuch zu veranschaulichen[1]).

Fig. 3432.



Der Eisenlohrschen Wellenmaschine zur Zusammensetzung von drei verschiedenigen Wellen gleicht die in den Fig. 3431 und 3432 dargestellte Wellenmaschine von rimsehl (Z. 17, 35, 1904).

Einen sinnreichen Apparat zur Erzeugung zusammengesetzter Schwingungen, lcher gleichzeitig gestattet, dieselben graphisch darzustellen, hat ferner Mach (Pogg. m. 129, 464, 1866) konstruiert.

Er ist in Fig. 3433 schematisch dargestellt. Eine Anzahl von Rädern *a, b, c,* am Umfange mit Kautschuk überzogen sind, stehen in gegenseitiger Berührung, daß sie sich alle mit gleicher Peripheriegeschwindigkeit drehen. Die Durchmesser n $a:b$ verhalten sich z. B. wie $1:{}^1/_2$, die von a und c wie $1:{}^1/_3$. Sie sind mit ften *d, e, f* versehen, welche in horizontale Schlitze der vertikal beweglichen hieber *g, h, i* eingreifen und diese nötigen, eine hin und her gehende Bewegung

[1]) Der Apparat ist zu beziehen von E. Leybolds Nachfolger in Köln zum Preise n 110 Mk.

auszuführen. Dadurch werden auch die Rollen *m*, *n*, *p*, über welche ein am linken Ende bei *z* befestigtes, am rechten durch das Gewicht *r* gespanntes Band läuft, in Bewegung versetzt und entsprechend längere und kürzere Schleifen gebildet, so daß der an dem Bande bei *s* befestigte Stift im gleichen Takte auf und ab pendelt und dabei auf der Platte *t*, welche durch die auf das Rad *a* sich aufwickelnde Schnur *Kv* gleichmäßig fortgezogen wird, die resultierende, den drei einfachen Bewegungen entsprechende Schwingungskurve aufzeichnet. „Bemerkenswert ist, daß man mit Hilfe eines derartigen Apparates beliebige Funktionen als Kurven darstellen kann, welche sich nach der Fourierschen Reihe entwickeln lassen. Auch die Differentialquotienten oder Integrale derselben Funktionen gibt der Apparat mit derselben Leichtigkeit. Somit liegt in ihm vielleicht der Keim zu einer künftigen Rechenmaschine höherer Art.“

Fig. 3433.

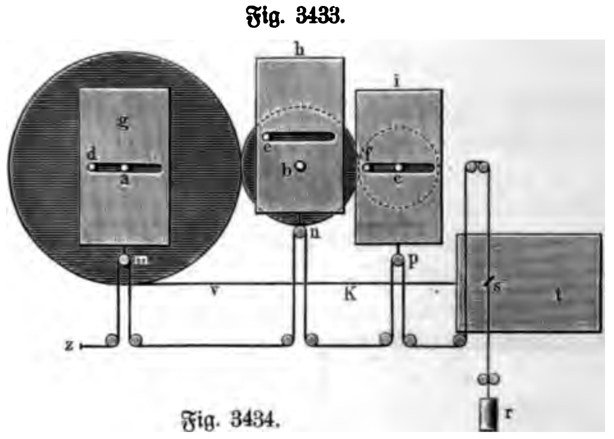
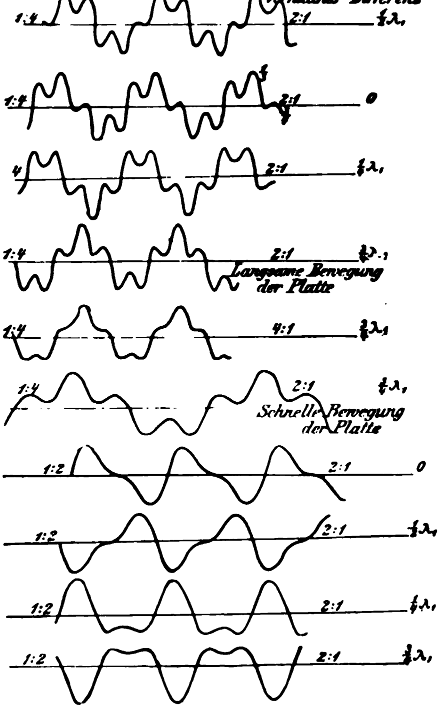


Fig. 3434.



Einen Apparat zur Herstellung der Kurven, welche durch Übereinanderlagerung zweier Sinuswellen entstehen, wie solche in Fig. 3434 1 bis 10 für verschiedenes Amplitudenverhältnis und verschiedene Phasendifferenzen, sowie für kleine und große Wellenlänge dargestellt sind, beschreibt Elsässer (Z. 16, 71, 1903). Derselbe besteht aus zwei hintereinander gesetzten Pendeln mit Öffnungen zum Durchtritt eines Lichtstrahles, welcher auf einer bewegten photographischen Platte die fraglichen Wellenkurven erzeugt.

Ein besonders hervorzuhebender Fall ist der, daß die beiden Schwingungszahlen nahezu gleich sind, wobei Schwebungen entstehen.

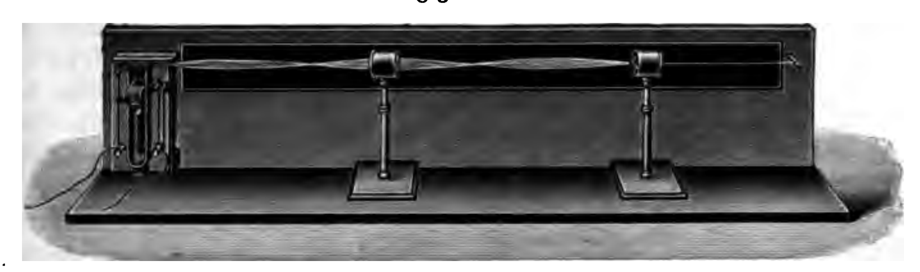
591. **Polarisation.** Richter (Z. 16, 92, 1903) benutzt zur Darstellung der Seilwellen einen Schlauch von 4 m Länge, durch welchen eine Schnur gezogen ist.

Zur Demonstration der Polarisation wird in der Nähe der Seilmitte ein Bindfaden festgeknüpft, dessen Enden von zwei Schülern in entgegengesetzter Richtung straff gehalten werden. Werden am einen Ende heftige Drehwellen erregt, so setzen

sich diese nur bis zu der Schnur (Polarisator) fort, dahinter bilden sich ebene Wellen, deren Schwingungsebene zur Schnur senkrecht steht. Durch abwechselndes Straffziehen und Wiederlockern der Schnur kann man den Polarisator in oder außer Tätigkeit setzen.

Um zu zeigen, daß eine ebene Wellenbewegung in verschiedenem Maße von einem Polarisator durchgelassen wird, je nach der Stellung des Polarisators zur Schwingungsebene, werden die beiden Bindfäden nicht an den Schlauch selbst festgeknüpft, sondern an einem Ring, durch den sich der Schlauch eben noch hindurchstecken läßt, so daß dem Polarisator leicht jede Richtung gegeben werden kann. Bringt man zwei solche Polarisatoren an, die zunächst in einer Ebene liegen und versetzt nun das eine Schlauchende in lebhafte Drehbewegung, so geht durch beide Polarisatoren eine ebene Wellenbewegung. Hält man den einen Polarisator fest und dreht den anderen, so dreht sich die Schwingungsebene der aus ihm austretenden Wellenbewegung mit, deren Amplitude wird aber immer kleiner und schließlich gleich Null, wenn beide aufeinander senkrecht stehen. Um die Art der Schwingung einzelner Seilteile auffällig zu machen, dienen weiße Papierscheiben, die mit zwei Parallelschlitzen versehen und auf den Schlauch geschoben werden.

Fig. 3435.



An Stelle der beschriebenen Polarisatoren kann man auch Schlitze benutzen, in welchen sich das Seil hin und her bewegen kann. Einen derartigen Apparat nach Macé de Lépinay (Z. 2, 87, 1888) zeigt Fig. 3435 (Länge 1,5 bis 2 m; Lb, 215 bis 240).

Man reguliert die Spannung des Fadens so, daß vier deutliche Schwingungsbäuche sich bilden und bringt den Polarisator in die Mitte des zweiten Bauches. Man findet dann, daß der Faden hinter dem Polarisator in der Ebene des Polarisators schwingt, während er zwischen Stimmgabel und Polarisation in allen möglichen Ebenen schwingt. Bringt man jetzt den Analysator an die Stelle des letzten Knotens und zwar so, daß die beiden Schlitze parallel sind, so ändert dieses an der Schwingung des Fadens nichts. Dreht man aber den Analysator allmählich, so sieht man, wie die Schwingungsebene sich gleichfalls dreht und wie die Amplitude abnimmt, bis sie, wenn der Schlitz des Analysators horizontal ist, gleich Null wird.

Einen erheblich komplizierter eingerichteten Polarisator verwendet Volkmann[1]) (Fig. 3436). Er gibt folgende Gebrauchsanweisung: Man spannt zwischen den Endhaken ein 2 m langes Seil aus zwei dünnen Spiralen aus und bringt nun an ihren Verknüpfungspunkt den Polarisator, der im wesentlichen einen starren, drehbaren Drahtrahmen darstellt. Die Spitze des Drahtrahmens kann sich nur senkrecht zu seiner Ebene bewegen und läßt daher nur diese Komponente einer Schwingung

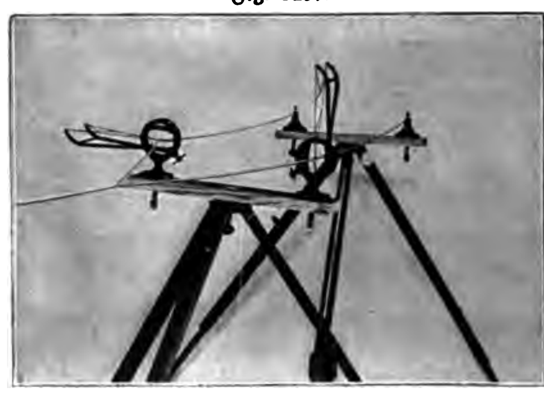
[1]) Derselbe ist zu beziehen von Georg Beck u. Co., Rummelsburg bei Berlin, Hauptstr. 4.

hindurch. Man zeigt dies, indem man die eine Spirale nacheinander nach verschiedenen Richtungen zupft und die Schwingungsweite und Schwingungsrichtung auf der anderen Spirale beobachten läßt. Diese Beobachtung wird sehr erleichtert, wenn man mitten an der Spirale ein Papierblättchen von der Größe eines Markstückes anbindet. Der Polarisator muß bei diesem und besonders bei den folgenden Versuchen genau an die richtige Stelle kommen. Man findet sie, indem man das Seil zunächst durch den Ring des Polarisators, aber frei von diesem, hindurchführt und nun den Polarisator so verschiebt, daß die Spitze des Drahtgefüges genau über den Verknüpfungspunkt der Spiralen kommt. Dann erst hakt man das Seil an dieser Stelle auseinander und von beiden Seiten in den Polarisator ein. Die Spannung des Seiles sei ein wenig größer als die der Spannfeder am Polarisator.

Fig. 3436.

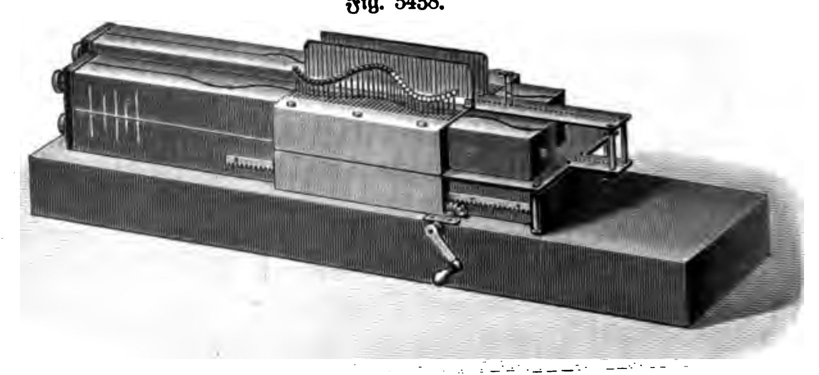


Fig. 3437.



Ein anderer Versuch ist folgender: Man fügt 3 m Seil mit zwei Polarisatoren zusammen und bringt das eine Ende im richtigen Takt in rotierende Bewegung.

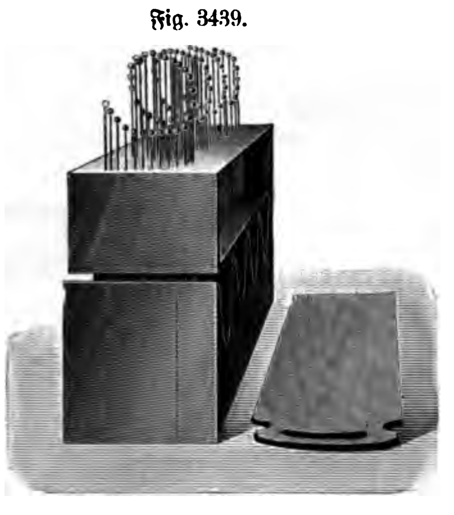
Fig. 3438.



Der erste Polarisator polarisiert die Welle linear, der zweite läßt hiervon einen seiner Stellung entsprechenden Betrag durch.

Die Zerlegung einer Zirkularwelle in zwei senkrecht polarisierte ebene Wellen kann gezeigt werden mit einer Versuchsanordnung, ähnlich der in Fig. 3426, S. 1342 dargestellten, wobei aber der Schwingungshebel durch zwei getrennte, voneinander unabhängige Stative ersetzt ist und in jedem der beiden Zweige Polarisatoren eingesetzt sind, deren Schwingungsebenen zueinander senkrecht sind (Fig. 3437).

Fig. 3439.

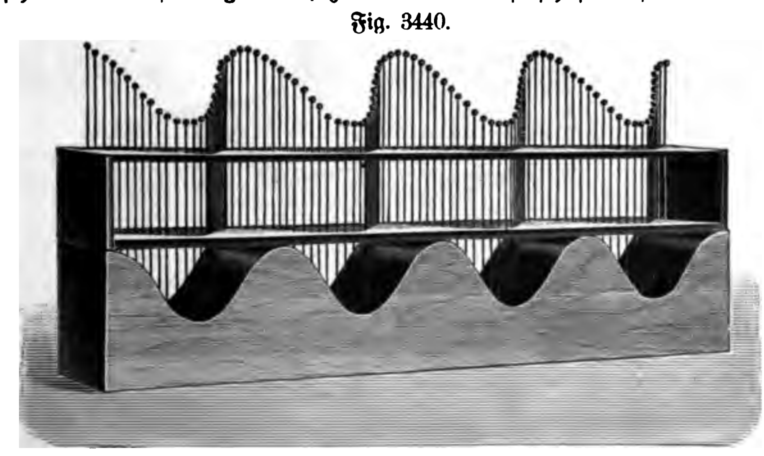


Durch die gleiche Versuchsanordnung kann man umgekehrt die Kombination zweier zueinander senkrechter, linear polarisierter Strahlen zu einem zirkular polarisierten zeigen [1]).

Ein einfacher Apparat zu gleichem Zweck wird nach Wheatstone erhalten durch Aufsetzen eines durch Stäbchen mit Perlen am oberen Ende (wie bei der oben erwähnten Maschine) gebildeten horizontalen Wellenzuges mit einem durch eine breite, hölzerne Schablone dargestellten vertikalen. (Fig. 3439 u. 3440 E, 36.)

Das beigelegte Holzbrett mit Griff wird auf den Holzunterbau und darauf wird der Holzrahmen mit den Stäbchen gelegt. Letzterer kann durch einfaches Verschieben in verschiedenen Gangunterschied zur unteren Welle gebracht werden. Man hält den Rahmen in seiner Stellung fest und zieht das Brett langsam darunter fort. Sieht man dann in der Fortpflanzungsrichtung der durch die Kügelchen dargestellten resultierenden Schwingung, so erhält man je nach dem gewählten Gangunterschied die Darstellung linear, zirkular oder elliptisch polarisierter Wellen.

Fig. 3440.



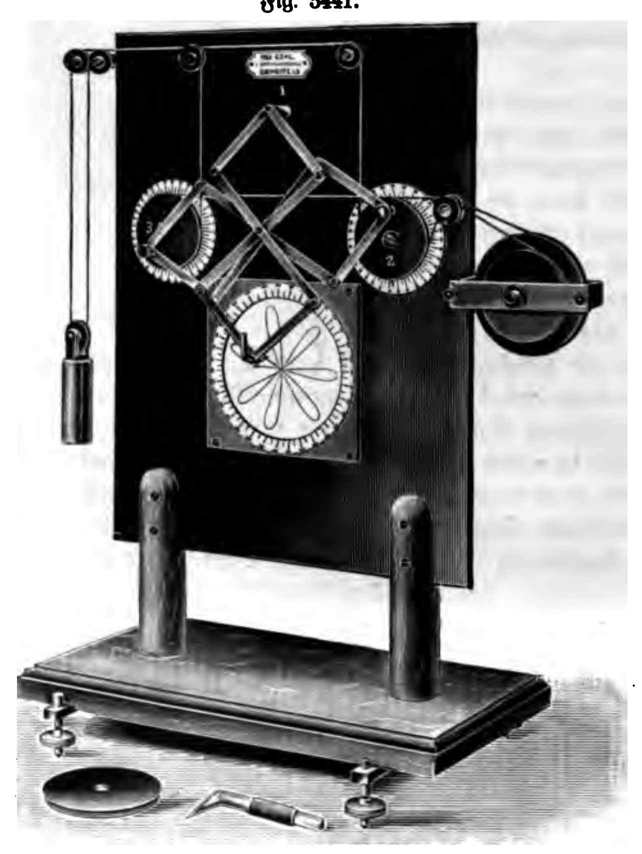
Eine Vorrichtung zur Erzeugung der resultierenden von zwei zirkularen Schwingungen, Kreisbewegungsdiograph genannt (Fig. 3441), beschreibt Salcher, Z. 17, 72, 1904. Der Apparat ist zu beziehen von Max Kohl in Chemnitz.

---

[1]) Eine Wellenmaschine nach Fessel und Plücker (Fig. 3438) zur Darstellung der zirkularen und elliptischen Wellenbewegung, sowie der Doppelbrechung liefert Max Kohl in Chemnitz zu 275 Mk.

592. Energie der Saitenschwingungen. **Die Kraft, mit welcher ein Pendel gegen seine Ruhelage zurückgezogen wird, ist $k = \frac{p}{l} \cdot \alpha$, seine Schwingungsanzahl $n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}$. Nun ist $p = m.g = m.4\pi^2.n^2.l$, also $k = 4n^2\pi^2 m\alpha$, und die Arbeit, um dem Pendel die Elongation α zu erteilen, da im Mittel die Kraft $2n^2\pi^2 m\alpha$ beträgt, $2n^2\pi^2 m\alpha^2$ Kilogrammeter. Dies ist die potentielle Energie im abgelenkten Zustande, welche sich während der Schwingung teilweise oder ganz in kinetische umwandelt und wieder rückwärts, welche aber ihrer Menge nach stets**

Fig. 3441.



gleich bleibt. Da eine Saite als Aggregat vieler Pendel betrachtet werden kann, ist ihre Energie im Schwingungszustande, da die Elongation eines einzelnen Teilchens $= \alpha . \sin \pi \cdot \frac{s}{l}$, wenn s der Abstand des Teilchens vom Anfang und l die Länge der Saite bedeuten:

$$V = 2n^2\pi^2 m\alpha^2 \Sigma \sin^2 \pi \frac{s}{l} = \pi^2 n^2 \alpha^2 ml \text{ Kilogrammeter.}$$

Hierin bedeuten α die Amplitude (den maximalen Ausschlag in m), l die Länge in m, n die Zahl ganzer Schwingungen pro Sekunde und m die Masse der Längeneinheit in Hyl (Gewicht in Kilogramm dividiert durch 9,81).

Soll beispielsweise eine Saite von 0,5 m Länge und 0,003 kg Gewicht durch einmaliges Streichen mit einem Violinbogen mit 0,2 m wirksamer Länge zur

Grundschwingung ($n = 6000$) mit 1 mm Amplitude veranlaßt werden, so ist die mittlere Kraft, mit welcher der Bogen geführt werden muß $= 1/0{,}2 . \pi^2 . 36 . 10^6 . 10^{-6} . 1/g . 0{,}003 . 0{,}5 = 0{,}27\,\mathrm{kg} = 270\,g$.

593. Schwingungen elastischer Stäbe. Ein etwa 2 m langes Stück von bandförmigem Stahl, welches man an einem Ende mit der Hand rasch hin und her bewegt, zeigt die Entstehung der Knotenpunkte sehr deutlich, da die Schwingungen weithin sichtbar sind (Fig. 3442). Es wird zweckmäßig weiß angestrichen und eventuell im Schraubstock befestigt (Fig. 3443).

Fig. 3442.

Spannt man in einem kleinen Schraubstock horizontal ein Stäbchen von etwa 1 qcm Querschnitt und 3 bis 4 dm Länge aus recht feinem und geradfaserigem Tannenholz ein, hält den Finger auf $1/3$ des Stäbchens und bestreut die obere Seite mit Sand, so kann man durch vertikales Anstreichen mit dem Geigenbogen in der Nähe des Fingers, aber gegen den Halter zu, einen Schwingungsknoten erzeugen.

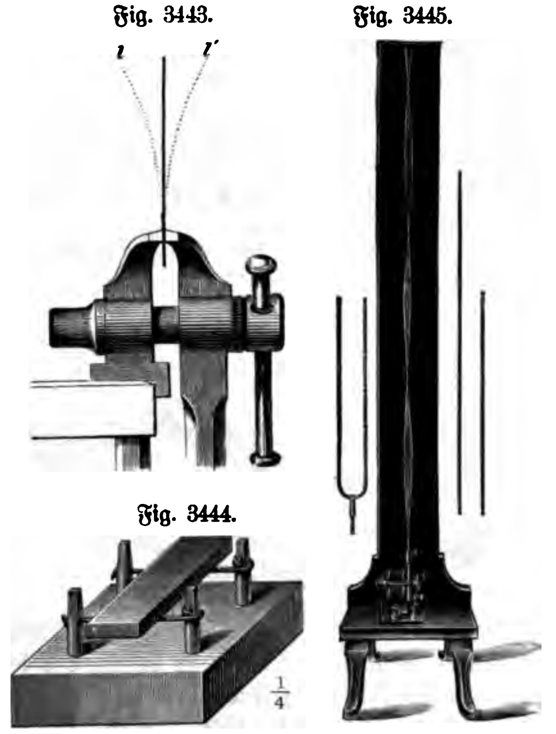


Fig. 3443. Fig. 3445. Fig. 3444.

Will man an frei liegenden Stäben, z. B. Stahlstäben, die Schwingungsknoten zeigen, so legt man dieselben entweder auf Fäden (Fig. 3444) oder auf zwei hölzerne Stege so, daß die unterstützten Stellen beiderseits um $1/5$ der ganzen Länge von den Enden abstehen. Ganz besonders eignen sich gehärtete Stahlstäbe von rechteckigem Querschnitte, deren Dicke etwa $1/4$ der Breite beträgt. Der Anschlag geschieht am besten mittels eines belederten hölzernen Hammers.

Durch fallende Wassertropfen kann ein horizontal auf zwei Schneiden liegender Stahlstab in starke Schwingungen versetzt werden, wenn die Tropfen in denselben Zeitintervallen fallen, in welchen die Schwingungen erfolgen.

Kappert benutzt Stäbe aus weißem Draht, welche durch einen Wagnerschen Hammer in Schwingung versetzt werden (Fig. 3445 Lb, 60).

Hält man den schwingenden Stab an einer Knotenstelle mit zwei Fingern fest, so wird dadurch an der Bewegungserscheinung nichts geändert, wohl aber werden die Schwingungen gestört oder aufgehoben, sobald man den Stab an einer anderen Stelle festhält. Die Schwingungsdauer eines Stabes (Fig. 3443) bestimmt sich nach der Formel $T = 8 \cdot \frac{l^2}{h} \sqrt{\frac{d}{e}}$ Sekunden, wenn l, h die Länge bezw. Dicke in Metern, d die Masse pro Cubikmeter in Hyl und e den Elastizitätsmodul pro Quadratmeter

bedeuten. Ist beispielsweise $l = h/4 = 2{,}5$ m, $h = 0{,}003$ m, $d = 7{,}8 . 10^3/9{,}81$ und $e = 21\,000 . 10^6$, so ist $T = \frac{8 . 2{,}5^2}{3 . 10^{-3}} \sqrt{\frac{7{,}8 . 10^3}{9{,}81 . 21 . 10^9}} = 3{,}2$ Sekunden.

Die Schwingungsdauer ist also unabhängig von der Breite des Stabes.

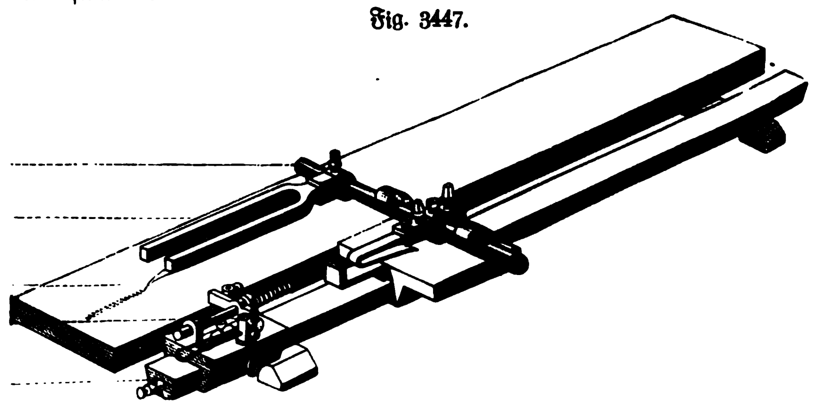
594. **Schreibende Stimmgabel** (Fig. 3446). Zum Nachweis der Schwingungen einer Stimmgabel wird die eine Zinke derselben mit einer leichten Spitze (aus Schablonenkupfer) versehen. Schlägt man nun die Stimmgabel an und führt sie über eine berußte Glasplatte hin, so daß die Spitze die Platte eben berührt, so verzeichnet diese in der Rußschicht ihre Schwingungen in Form einer regelmäßigen Sinuskurve, die man leicht mittels des Projektionsapparates objektiv machen kann.

Fig. 3446.



Man kann auch das Entstehen der Kurve zeigen, indem man die berußte Platte zuerst im Projektionsapparat befestigt und nun erst die Stimmgabel darüber hinführt. Zum Berußen der Glasplatte dient am besten eine rauchende Petroleum- oder Terpentinölflamme.

Fig. 3447.



Um regelmäßigere Kurven zu bekommen, kann man sich der Schlittenführung Fig. 3447 (K, 180), bedienen oder der rotierenden und zugleich fortschreitenden Trommel Fig. 3448 (Lb, 100), welche gewöhnlich mit berußtem glattem Papier überzogen wird. Die Stimmgabel wird dabei in ein Stativ fest eingespannt.

Noak verwendet eine Trommel mit schwarzem Glasmantel, welche schwach mit Vaselin eingefettet und mit Lykopodium bestäubt wird; die Wellenlinien treten dann scharf schwarz auf gelblichem Grunde hervor. Zur Umdrehung der Trommel dient ein schweres konisches Pendel (Fig. 3449), dessen Umlaufszeit nach der bekannten Pendelformel bestimmt werden kann (E, 75).

Wird eine solche Trommel mit einer umlaufenden Transmissionswelle gekuppelt, so kann man, je nachdem die entstehenden Wellen gleich oder ungleich lang sind, den Gleichförmigkeitsgrad der Leistung der Maschinenanlage beurteilen.

Zur Demonstration der Bestimmung einer Schwingungszahl kann man auch eine runde Scheibe von Glanzpappe von 20 bis 25 cm Durchmesser, Fig. 3450 (L, 2,50), verwenden. Man befestigt sie, nachdem man sie mittels einer Terpentinflamme

berußt hat (zweckmäßig mit einer stärkeren Pappscheibe als Unterlage), auf der Schwungmaschine, und fährt, nachdem sie konstante Tourenzahl angenommen hat, mit der Spitze der schreibenden Stimmgabel von der Mitte nach dem Rande darüber.

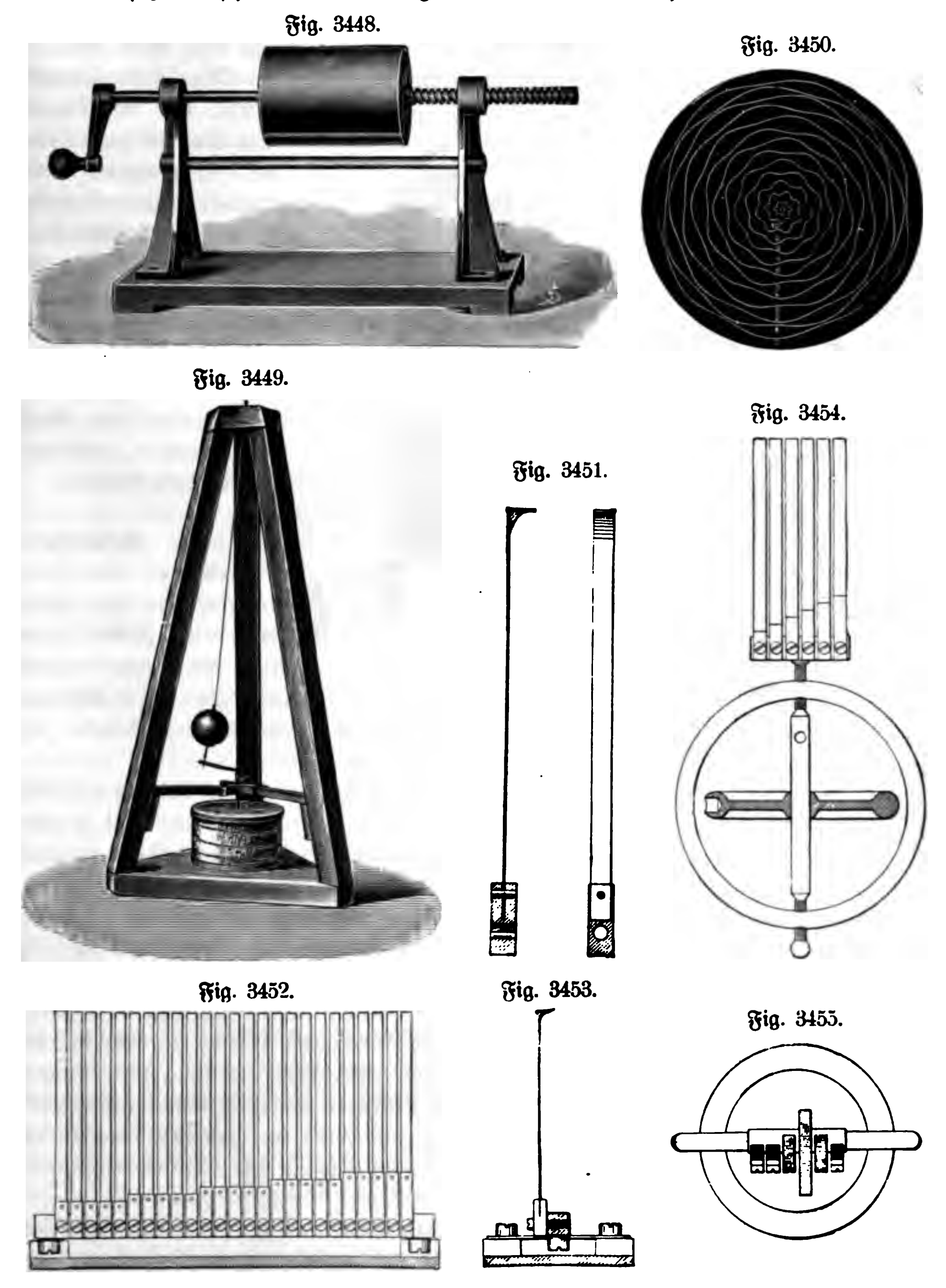
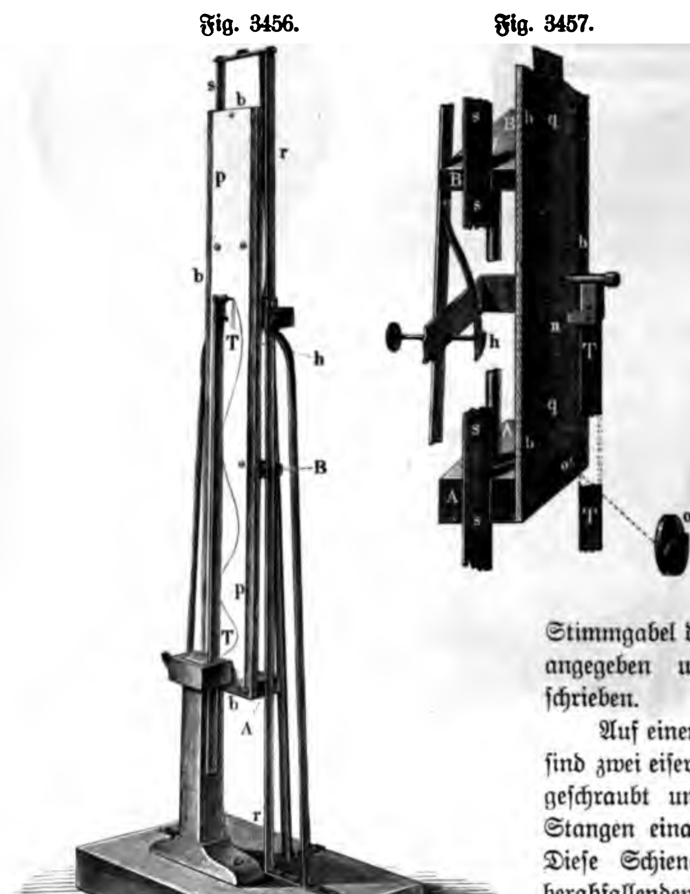


Fig. 3448. Fig. 3450. Fig. 3449. Fig. 3451. Fig. 3454. Fig. 3452. Fig. 3453. Fig. 3455.

Da in dem abgebildeten Falle auf zehn Umdrehungen 75 Schwingungen entfallen und die Umdrehungszahl mittels des Tourenzählers = 17 pro Sekunde gefunden wurde, ist die Schwingungszahl 7,5 . 17 = 127,5.

595. Der Geschwindigkeitsmesser von Frahm[1]) beruht auf dem Mitschwingen von Stahlzungen (Fig. 3451, 3452 und 3453). In manchen Fällen genügen schon die natürlichen Erschütterungen einer Maschine z. B. infolge davon, daß der Schwerpunkt des Schwungrades nicht genau in der Achse liegt. Man kann dies demonstrieren bei einem Kreisel, wie er als Spielzeug benutzt wird, wenn man an der oberen Lagerschraube einen Kamm von Stahlzungen befestigt (Fig. 3454), vorausgesetzt, daß etwa durch Anbohren auf einer Seite der Schwerpunkt des Kreisels etwas verlegt ist. Je nach der Geschwindigkeit des Kreisels zeigt die eine oder andere Stahlzunge einen kräftigen Ausschlag (Fig. 3455). In anderen Fällen bedient man sich eines Daumenrades, um den Kamm zu erschüttern.

Fig. 3456. Fig. 3457.



596. Pesograph, Lapsometer. Eine Vorrichtung, um das Gesetz des freien Falles mittels einer schreibenden Stimmgabel darzustellen, hat J. Müller angegeben und folgendermaßen beschrieben.

Auf einem starken Brett, Fig. 3456, sind zwei eiserne Schienen, *r* und *s*, aufgeschraubt und durch mehrere eiserne Stangen einander parallel festgehalten. Diese Schienen dienen dem vertikal herabfallenden gußeisernen Klotze *A*, dessen Gestalt aus Fig. 3457 besser zu erkennen ist, zur Führung. Um diese Führung noch sicherer zu machen, ist eine ganz gleich gestaltete, nur weniger hohe gußeiserne Platte *B* durch zwei eiserne Stäbchen mit *A* verbunden, wie man in Fig. 3457 sieht. An der Vorderseite von *A* und *B* ist ein ungefähr 5 mm dickes Brett *b* aufgeschraubt, auf welches ein Papierstreifen *p* mit Stiften aufgesteckt werden kann.

Vor dem mit *A* und *B* fallenden Brett *b* befindet sich nun ein elastischer Stahlstab *T*, welcher ungefähr 13 mm breit und 4 mm dick an das obere Ende eines feststehenden hölzernen Pfeilers so angepreßt ist, daß der obere ungefähr 52 cm lange Teil des Stabes frei oscillieren kann. An seinem oberen Ende trägt dieser

[1]) Zu beziehen von Friedrich Lux, Ludwigshafen a. Rhein.

Stahlstab eine Messinghülse, in welche ein Stückchen Bleistift eingelegt ist, dessen Spitze durch eine schwache Spiralfeder leicht gegen den Papierstreifen *p* angedrückt wird.

Um den Versuch zu machen, muß die Stellung des Apparates so justiert werden, daß die Schienen *r* und *s* genau vertikal stehen. Alsdann wird *A* so hoch gehoben, daß seine untere Fläche auf dem Haken *h* ruht, welcher an dem unteren Ende einer Stahlfeder angebracht ist.

Bevor aber *A* in dieser Stellung festgestellt wird, muß der Stab *T* so weit auf die Seite gebogen werden, daß ein an ihm befestigtes Stahlstiftchen *n* in eine Vertiefung des auf das Brett *b* und den eisernen Kloß *A* aufgeschraubten Eisenstückchens *o* eingreift.

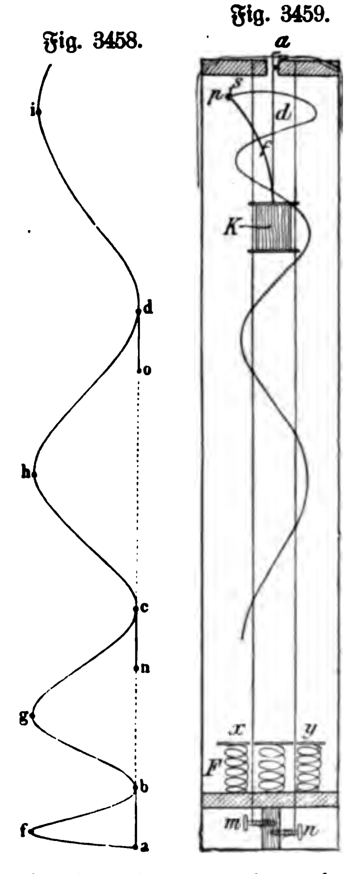


Fig. 3458. Fig. 3459.

Nachdem nun alles gehörig eingestellt worden ist, wird der Haken *h* mittels des Stäbchens *q* zurückgezogen. Infolgedessen beginnt *A* zu fallen, während *T* gleichzeitig zu oscillieren beginnt und der Bleistift am oberen Ende von *T* auf den mitfallenden Papierstreifen *p* seine Schwingungskurve schreibt.

Durch diese Schwingungskurve, Fig. 3458, wird nun das Fallgesetz sehr anschaulich dargestellt. Während der ersten, zweiten, dritten Oscillation des Stabes *T* werden die Räume *ab*, *bc*, *cd* durchfallen und die Messung dieser Fallräume zeigt, daß $ac = 4\,ab$, $ad = 9\,ab$, daß sich also die Fallräume wirklich wie die Quadrate der Fallzeiten verhalten.

Rabs in München hat den Apparat dadurch verbessert, daß er die beiden Stäbe, zwischen welchen der fallende Körper gleitet, durch eine einzige gußeiserne Schiene ersetzt, an welcher der Körper mit sogenannter Schwalbenschwanzführung als Schlitten herabgleitet.

Lippich (1865) verwendet vier schreibende Spitzen, welche auf ein (über Terpentinölflamme) berußtes Glas zeichnen, nämlich die eine die Schwingungskurve, die beiden äußersten gerade Linien, welche die Schwingungskurve berühren, und die mittlere die Mittellinie der Schwingungskurve [1]).

Lebourg (1878) läßt einen vertikal geführten Körper fallen, der oben eine Stimmgabel mit Schreibspitze trägt, welche die Schwingungen auf eine berußte Schiene aufzeichnet.

R. Neumann (Z. 11, 179, 1898) befestigt ebenso einen federnden Stab, welcher die Schwingungskurve auf Papier aufzeichnet, wie Fig. 3459 zeigt, an einem fallenden Gewicht, während das Papier feststeht.

Engelbert (1880) läßt einen Stab vertikal vor einem schwingenden Stahlblech herabfallen, welches an seinem Ende mit einem mit Farbe getränkten Pinsel

---

[1]) Zu beziehen von Dr. Houdek u. Hervert, Prag, zu 90 fl.

versehen ist, der auf dem Stab gleiche Zeitintervalle markiert. Die Bewegung des Stabes wird durch die erste Ausbiegung der Lamelle ausgelöst.

Kraß (1885) benutzt einen ähnlich konstruierten Apparat (Fig. 3460) zur Demonstration der Geschwindigkeitsänderungen bei der Pendelbewegung. (K, 85.)

Elsässer (Z. 13, 194, 1900) legt über zwei Fallmaschinenräder ein schmales

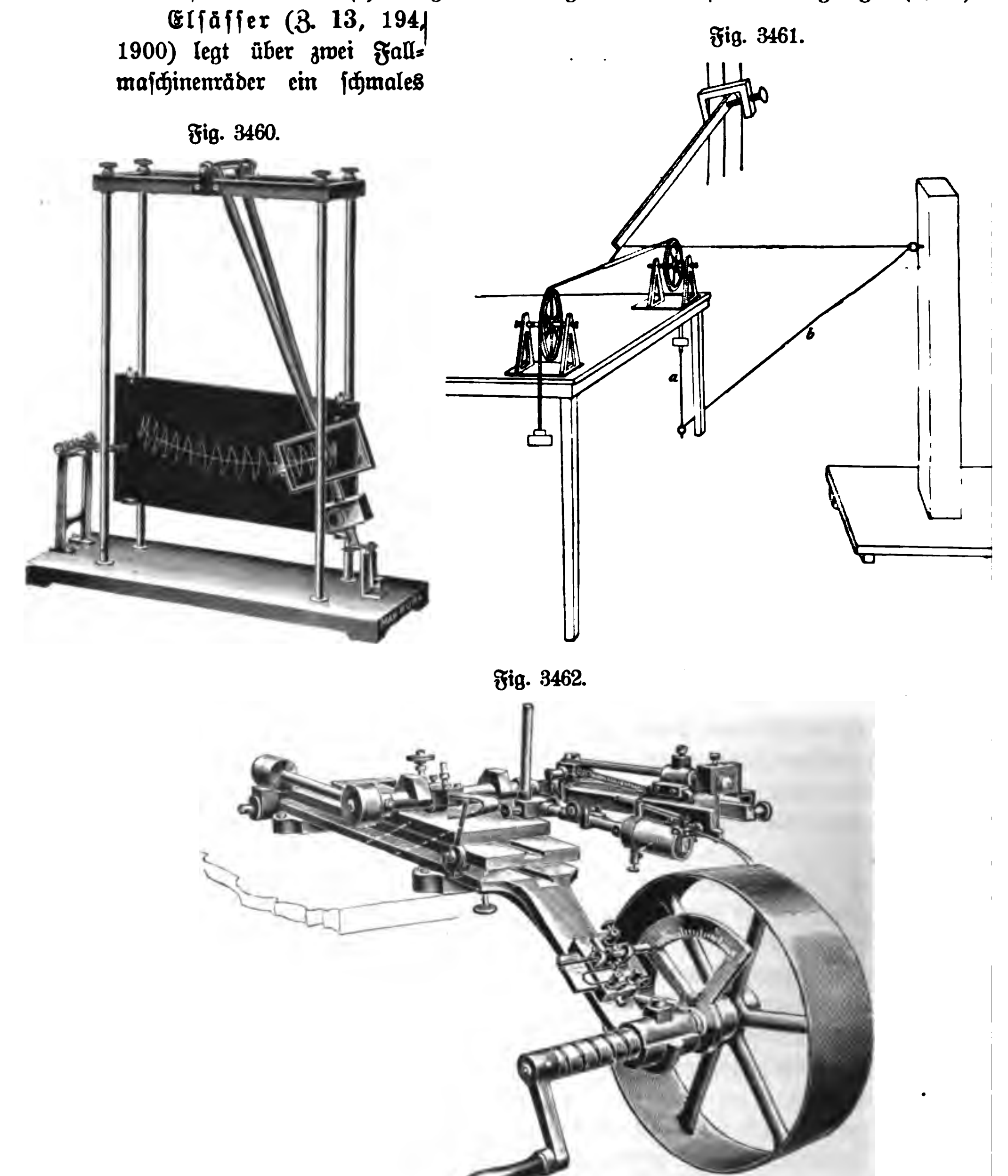


Fig. 3460.

Fig. 3461.

Fig. 3462.

Seidenband von $2^1/_2$ mm Breite, das bis zur halben Entfernung vom Fußboden auf beiden Seiten herunterhängt und an den Enden gleiche Gewichtsstücke trägt (Fig. 3461). In der Mitte wird darauf ein sehr dünner, berußter Glasstreifen

befestigt, auf welchen eine schreibende Stimmgabel Wellenlinien einzeichnet. Auf der einen Seite wird dann ein Übergewicht aufgelegt und durch Abbrennen des Fadens die Bewegung ausgelöst [1]).

597. **Stimmgabeluhr.** Bei der Stimmgabeluhr von Niaudet (Fig. 3463 Lb, 1750) wird das Steigrad durch die Schwingungen der Stimmgabel beeinflußt, und die Stimmgabel selbst erhält dadurch bei jeder Schwingung einen leisen Anstoß, der hinreicht, die Schwingungen der Gabel zu unterhalten. Aufziehen des Uhrwerks während des Ganges bewirkt keine Störungen. Ein Zifferblatt ist in 128 Grade eingeteilt. Vollendet der Zeiger desselben in einer Sekunde einen Umgang, so hat die Stimmgabel genau 128 Schwingungen pro Sekunde; das zweite und dritte Zifferblatt zeigen Sekunden, Minuten und Stunden an [2]).

598. **Meldes Apparat.** Melde weist die Stimmgabelschwingungen nach, indem er sie in Fadenschwingungen umsetzt (Fig. 3464 K, 120). Ein starker, weißer Faden ist vor einer schwarzen Leiste ausgespannt, einerseits an einer Zinke einer Stimmgabel befestigt, anderseits in einer auf der Leiste verschiebbaren Klemme. Die Verbindung mit der Stimmgabel ist in der Weise

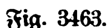

Fig. 3463.



Fig. 3464.



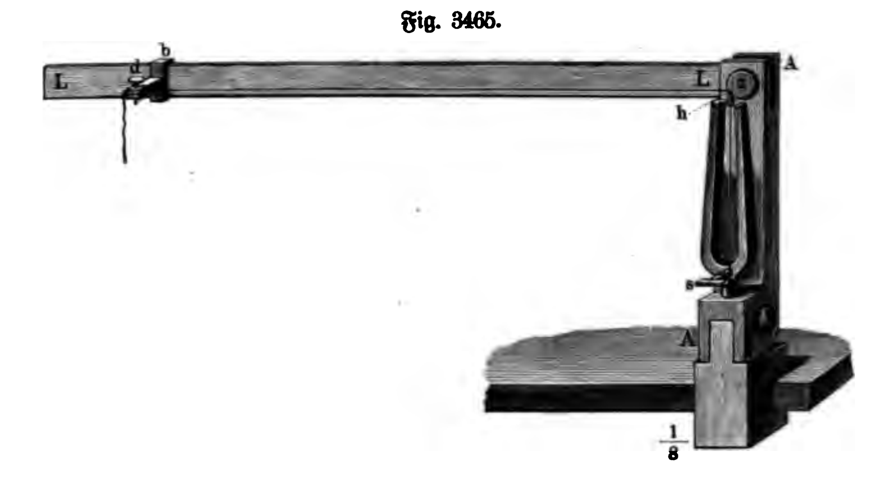
ausgeführt (Fig. 3465), daß an dem Ende der einen Zinke ein kleiner Ansatz aus Messing befestigt ist, welcher mit einem Öhr versehen ist, durch welches der Faden durchgezogen wird. Derselbe wendet sich dann senkrecht herab und endet an

[1]) Über die Verwendung einer schreibenden Stimmgabel zu messenden Versuchen über einen Fall auf der schiefen Ebene und Reibung siehe O. Reichel, Z. 5, 15, 1891; 14, 4, 1901. Einen richtigen Vibrationschronographen (Fig. 3462) liefert das mech.-phys. Institut von Dr. Th. Edelmann in München zu 350 Mk. — [2]) Der Apparat ist noch insofern von besonderem Interesse, als er die Umsetzung von Schwingungsenergie in mechanische Arbeit zeigt.

einem Wirbel am Fuße der Stimmgabel, durch dessen Drehung die Spannung reguliert wird. Schwingt der Faden als einzige halbe Welle und vergrößert man die Länge auf das Doppelte bei gleicher Spannung, so entstehen zwei halbe Wellen u. s. w. Durch Änderung der Spannung auf das Vierfache wird die Schwingungszahl verdoppelt u. s. w. Ein doppelt so dicker Faden gibt eine halb so lange Welle u. s. w.

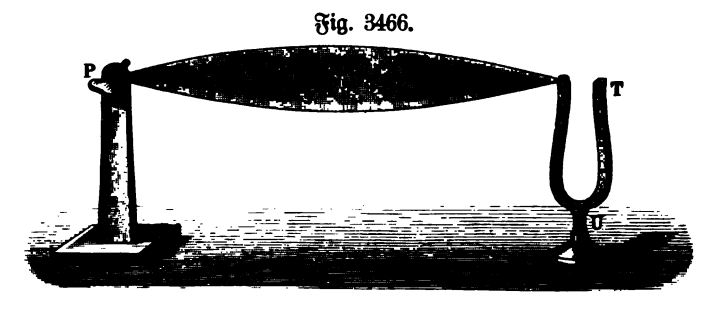
Tyndall beschreibt einen Versuch nach Meldes Methode in folgender Weise: „Der Versuch wurde mit einem, in Form einer Stimmgabel gebogenen, auf einem

Fig. 3465.



schweren Ständer aufgestellten Stahlstab (Fig. 3466, *UT*) von $1^{2}/_{3}$ m Länge, 3,7 cm Breite und 1,3 cm Dicke angestellt. Die Zinken dieser Gabel waren 5 cm voneinander entfernt. Die an ihnen befestigte Schnur war 3 m lang und 0,6 cm dick. Die Zinken wurden in Schwingungen versetzt, indem man sie schnell mit zwei überpolsterten Stücken Blei, von

Fig. 3466.

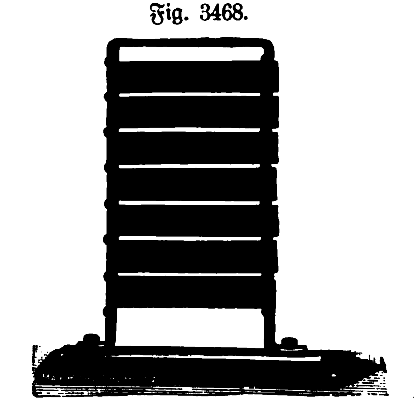


denen man jedes in einer Hand hielt, schlug. Die Zinken schwangen transversal gegen die Schnur. Die Schwingungen durch einen einzigen Schlag genügten, um die Schnur durch verschiedene Unterabteilungen hindurch und wieder zu einem einzigen Bauche zurückzuführen; d. h. wenn man gegen die Zinken schlug und die Schnur dann als Ganzes schwang, so konnte man sie durch Verminderung der Spannung in zwei, drei oder vier schwingende Teile zerlegen und darauf durch Vermehrung der Spannung wieder durch vier, drei und zwei Teile zu einem zurückkehren lassen, ohne daß man die Zinken von neuem anzuschlagen brauchte. Die Schnur war so gewählt, daß, statt in derselben Ebene hin und her zu schwingen, ihre Punkte Kreise beschrieben. Daher waren die Bäuche nicht mehr Ebenen, sondern Umdrehungsflächen und wurden von allen Teilen des Zimmers gleich gut gesehen.“

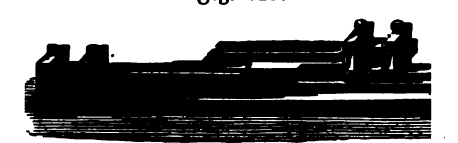
Zur Erregung der Stimmgabel benutzt Melde ein an die freie Zinke befestigtes nnes Glasstäbchen (Streichstäbchen), welches der Länge nach mit benetztem Daumen d Zeigefinger gerieben wird [1]).

Duboscq (1884) konstruiert den Apparat so, daß man die Fadenschwingungen ttels des Projektionsapparates an der Wand darstellen kann.

Valerius (1865) befestigte einfach mit etwas Wachs einen Faden an einer nke einer Stimmgabel und beschwerte das andere über einen Haken geführte Ende t einem Wachskügelchen. Drehte er die Gabel ı 90°, so teilte sich der ursprünglich ganz wingende Faden in zwei Abteilungen.


Fig. 3468.

599. Zusammensetzung der Schwingungen. e Fig. 3467 (Lb, 110) zeigt die Verwendung : schreibenden Stimmgabel zur Herstellung zu-


Fig. 3467.

nmengesetzter Wellenkurven, wie sie in Fig. 3468 (K, 24) dargestellt sind, indem ın die berußte Glasplatte auf einer zweiten Stimmgabel befestigt. Man kann f diese Weise insbesondere auch die Entstehung der Schwebungen demonstrieren.

600. Zerlegung der Schwingungen. Ein Stab von rechteckigem Querschnitt ordert zur gleichen Durchbiegung verschieden große Kraft je nach der Richtung r Biegungsebene zu den beiden Querschnittsseiten, und zwar ist dieselbe ein Maxi- ım für die Schwingungsrichtung parallel der längsten Querschnittsseite, ein inimum für die dazu senkrechte Richtung. Dementsprechend ist die Schwingungs- uer für die erste Richtung ein Minimum, für die andere ein Maximum.

Wird nun der Stab in beliebiger Richtung gestoßen, so schwingt er keineswegs der Richtung des Stoßes, vielmehr nach den beiden genannten Richtungen größter d kleinster Elastizität und man erhält deren Intensität (Amplitude), indem ın die Stoßkraft in zwei Komponenten parallel den beiden fraglichen Richtungen legt denkt. Das Ende des Stabes beschreibt infolgedessen Lissajoussche Figuren, ren Form durch die Querschnittsgestalt des Stabes bestimmt ist.

Gleiches gilt für Stäbe von kreisförmigem Querschnitte, deren Struktur aniso- op ist, so daß man aus dem Auftreten solcher Schwingungszerlegung (Doppel- echung) auf vorhandene Anisotropie schließen kann.

601. Schwingungsknoten auf Flächen. Klangfiguren. Bei der Auswahl der lasscheiben für diesen Zweck sehe man auf reines, gleichförmig dickes Glas von r Stärke des gewöhnlichen Fensterglases. Wenn es dick ist, so sind die Scheiben ilich dauerhafter, geben aber nicht leicht komplizierte Figuren. Die Größe ist an ß ziemlich gleichgültig, quadratische Scheiben können von 1 bis 2 dm Seite er-

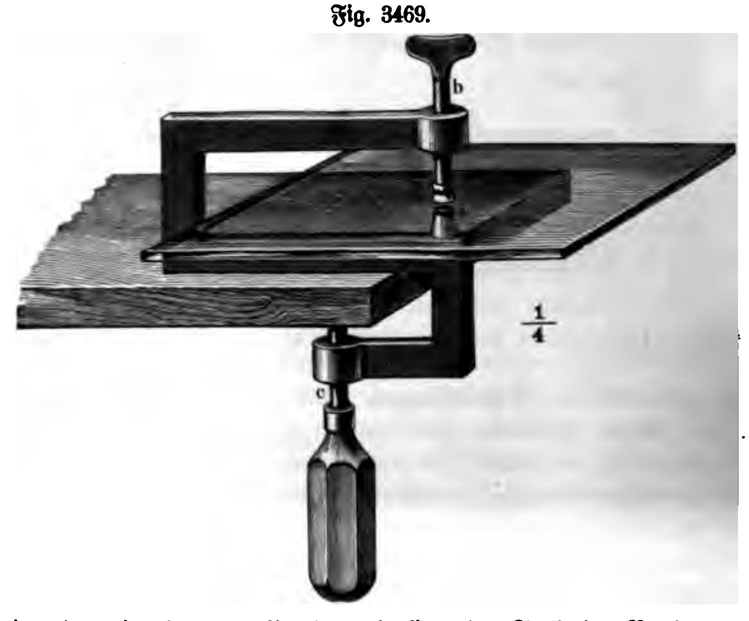
[1]) Bezüglich der mannigfaltigen Variationen von Meldes Versuchen sehe man ssen „Akustik“, Leipzig 1883, F. A. Brockhaus.

halten; zu kleine Scheiben geben aber nur schwer kompliziertere Figuren und zu große brechen leicht. Die Ränder werden auf einem Sandsteine ihrer scharfen Kanten beraubt. Zum Einspannen ist der Apparat Fig. 3469 sehr bequem; er wird von Eisen oder recht zähem Holze gemacht, und zwar aus letzterem verhältnismäßig stärker. Den festgenieteten kleinen Knopf *a*, sowie das knopfförmige Ende der Schraube *b* überbindet man mit einem Stückchen starken Handschuhleders. Mittels der Schraube *c* wird dieser Halter am Rande eines Tisches befestigt.

Zum Streichen nimmt man am besten einen Violoncellbogen, da Violinbögen etwas schwach sind; er wird straff gespannt und wohl mit Kolophonium bestrichen.

Soll nun irgend eine bestimmte Klangfigur erregt werden, so spannt man die Glasscheibe an einem Kreuzungspunkte der Knotenlinien zwischen die Knöpfe *a* und *b*,

Fig. 3469.



hält an einer dem eingespannten Punkte nahe liegenden Stelle des Randes, an welcher ein Ast einer Knotenlinie auslaufen soll, die Spitze des Fingers an die Scheibe und streicht nun mit dem Bogen vertikal an einer solchen Stelle des Randes, an der die Scheibe Bewegung machen muß, herunter, nachdem man vorher mit der Hand staubfreien Sand auf die Scheibe gestreut hat. Gewöhnlich muß man wiederholte Bogenstriche machen, bis die Figur rein ist. Der geeignetste Sand ist der Streusand von den Goldwäschen. Nicht immer wird die verlangte Figur gelingen, man wird oft eine andere, als die gesuchte erhalten; es hängt dieses von der nach verschiedenen Richtungen ungleichen Elastizität der Glastafel ab. Gelingt es bei den drei Punkten zum Einspannen, Anhalten und Anstreichen nicht, so versucht man es mit anderen. Für den Unterricht genügt es aber, das senkrechte und das schiefe Kreuz auf einer quadratischen Scheibe, das Kreuz und den sechsstrahligen Stern auf einer runden Scheibe zu zeigen, und diese fehlen selten. Für alle spannt man in der Mitte ein, hält an einem Aste den Finger an und streicht zwischen zwei Ästen, also beim senkrechten Kreuze auf einer quadratischen Scheibe nahe an der Ecke. Bei wiederholten Versuchen muß man das Leder an den Knöpfen *a* und *b* stets von

Sand reinigen; denn sonst schneiden gern einzelne Sandkörner beim Zuschrauben in das Glas und die Scheibe bricht beim Anstreichen.

Zweckmäßiger sind deshalb Metallplatten (Messingscheiben von 2 bis 3 mm Dicke), vorausgesetzt, daß sie gleichmäßige Beschaffenheit haben, was nicht immer zutrifft. Ich verwende eine solche Platte von quadratischer Form mit 50 cm Seiten-

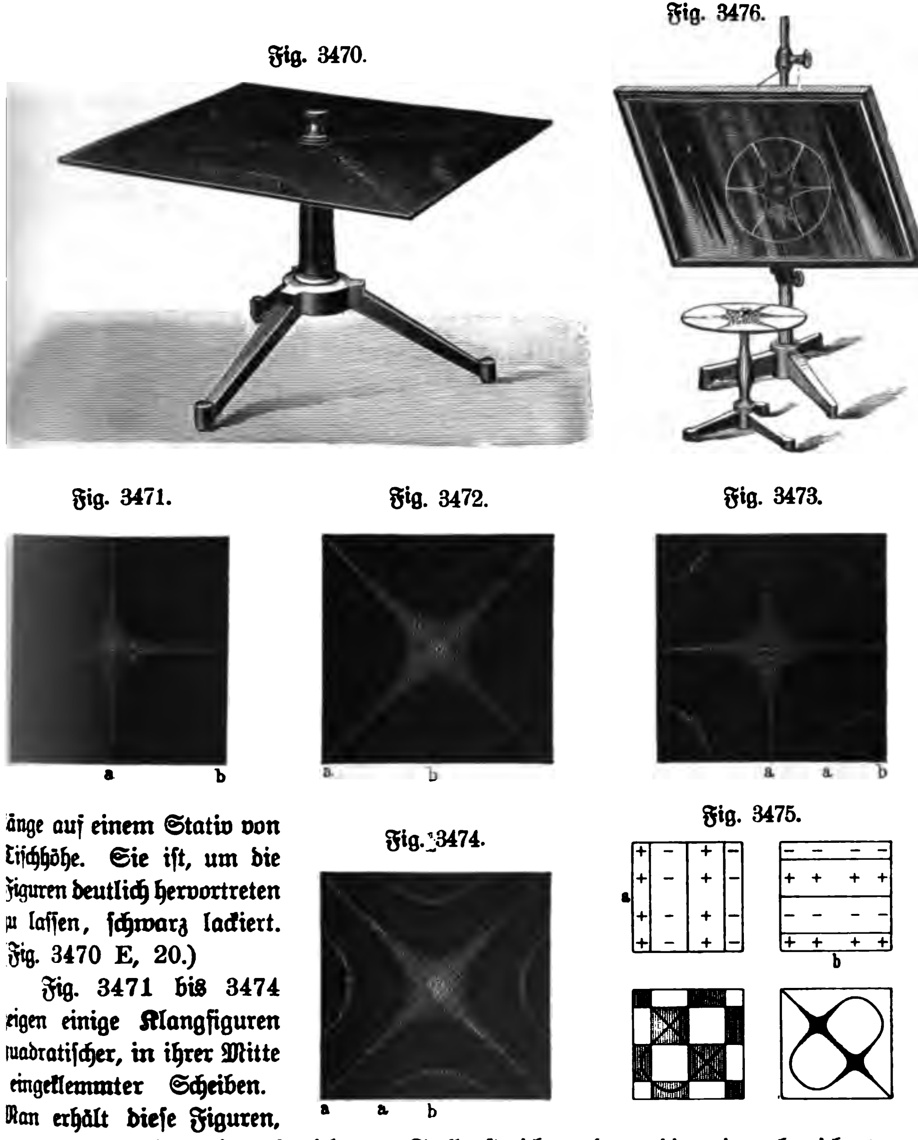


Fig. 3470. Fig. 3476. Fig. 3471. Fig. 3472. Fig. 3473. Fig. 3474. Fig. 3475.

länge auf einem Stativ von Tischhöhe. Sie ist, um die Figuren deutlich hervortreten zu lassen, schwarz lackiert. (Fig. 3470 E, 20.)

Fig. 3471 bis 3474 zeigen einige Klangfiguren quadratischer, in ihrer Mitte eingeklemmter Scheiben. Man erhält diese Figuren, wenn man an der mit *b* bezeichneten Stelle streicht und an die mit *a* bezeichneten Punkte einen Finger anhält.

Wenn die Scheibe in Fig. 3475 durch Anstreichen in *a* drei Knotenlinien geben würde und durch Anstreichen in *b* eben so viele und man bezeichnet die Richtung der gleichzeitigen Schwingungen nach oben und unten auf beiden mit + und —, so wird bei Superposition beider Schwingungen bald + auf +, bald + auf — fallen. Die in der dritten Figur schraffiert gezeichneten Stellen sind die-

jenigen, wo + und — zusammenfallen, also die Bewegung aufhört. Verbindet man diese Stellen durch Linien, so erhält man die danebenstehende Klangfigur.

Stöhrer benutzt einen Spiegel von 50 cm Länge und 36 cm Breite, welcher unter 45° gegen die Klangplatten aufgestellt wird, um die Figuren einer größeren Zuhörerzahl sichtbar zu machen (Fig. 3476 S, 28).

Stöhrer jun. projiciert die Klangfiguren während ihres Entstehens auf einen Schirm. Die aus dünnem Glase bestehenden Platten werden mittels einer gabelförmigen Klammer in dem Apparate für Horizontalprojektion befestigt und durch angekittete Haare, welche man zwischen Daumen und Zeigefinger faßt, nachdem man die Finger mit Kolophonium eingerieben hat und alsdann langsam der Länge nach streicht, in Schwingung versetzt.

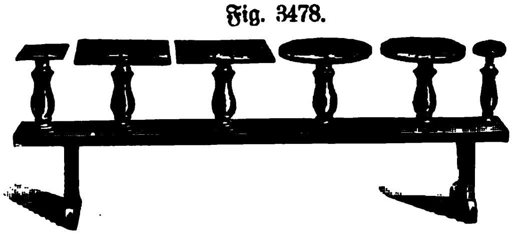
Von einer an einer Klangscheibe befestigten Saite werden die Schwingungen auf die Scheibe übertragen und können dort durch aufgestreuten Sand sichtbar gemacht werden [1]).

602. Glocken. Um die Knotenlinien von glockenförmigen Körpern sichtbar zu machen, dient jeder etwas weite Glascylinder, selbst jedes dünnwandige Trinkglas. Man füllt dasselbe zur Hälfte mit Wasser und streicht den Rand mit einem gut geharzten Geigenbogen; kleinere Gläser hält man dabei am Boden mit zwei Fingern auf dem Tische fest, größere Gläser bedürfen natürlich des Haltens am Boden nicht, dagegen ist es zweckmäßig, den Finger in einer Entfernung von 45° von der gestrichenen Stelle anzulegen.

Fig. 3477.



Fig. 3478.



Auch durch angehängte leichte Pendelchen können die Schwingungen einer Glocke leicht sichtbar gemacht werden (Fig. 3477 Lb, 20).

603. Schwingende Systeme. Befestigt man eine Anzahl Klangscheiben von passender Größe auf demselben Gestell, so bilden sich beim Anstreichen der einen die Figuren auch auf den anderen (Fig. 3478 Lb, 70).

---

[1]) Die Erzeugung von Klangfiguren bei Schwingungszahlen von 40000 bis 60000 beschreibt K. Antolik, Direktor der Oberrealschule in Pozsony [Preßburg], in Praktische Physik 4, 125, 1891. — Eine Äoline nach Marx zur Erzeugung von Klangfiguren auf dünnen Membranen liefert Max Kohl in Chemnitz zu 22,50 Mk. Ausführlich behandelt die Klangfiguren gespannter Membranen und starrer Platten Antolik in Verhandl. des Vereins für Natur- und Heilkunde zu Preßburg 24, 1903. Als beste Methode der Erregung von Membranen bezeichnet er das Aufsetzen einer Stimmgabel an einer geeigneten Stelle des Rahmens. Zum Halten derselben dient ein an den Stiel angeklemmter Holzstab.

604. Longitudinalwellen. An einer langen, an beiden Enden befestigten Stahldrahtspiralfeder, welche etwas angespannt ist, kann man leicht das Fortschreiten und die Reflexion eines longitudinalen Stoßes, sowie die Bildung stehender Wellen beobachten. Ich benutze dazu dieselbe Feder, welche zur Demonstration der Transversalschwingungen gebraucht wurde (Gewicht 2,3 kg, Länge 3,5 m). Sie wird an der Decke des Auditoriums vertikal herabhängend befestigt, durch ein Gewicht $k = 5$ kg gespannt, wobei sie sich um 1,95 m verlängert, und in diesem Zustande sodann auch unten befestigt. Zerrt man sie nun vorübergehend in der Längsrichtung, so schwingt sie in der Mitte hin und her, während die Enden fest bleiben.

Die Schwingungsdauer muß nach der Pendelformel sein: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{f}}$, wobei wie bei den Transversalschwingungen für m nicht die ganze Masse dlq (d = Dichte, l = Länge, q = Querschnitt) eingesetzt werden darf, sondern nur $\frac{4}{\pi^2}dlq$. Zerrt man sie in der Mitte, so ist die Kraft zur Dehnung der oberen Hälfte bei der Elongation α $k_1 = \frac{\alpha . q . E}{l/2}$, ebenso groß ist die Kraft k_2 zur Zusammendrückung der unteren Hälfte, wenn E den Elastizitätsmodul bedeutet, somit die ganze Kraft $K = k_1 + k_2$ und $f = K/\alpha = 4\,Eq/l$ kg, also

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{4\,dlql}{\pi^2 . 4\,Eq}} = 2l\sqrt{\frac{d}{E}}.$$

In dem betrachteten Beispiel ist $d = \frac{2,3}{9,81 . 3,5 . 9}$ und $E = \frac{5 . 2,3}{1,95 . 9}$, somit

$$T = 2\sqrt{\frac{2,3 . 1,95}{9,81 . 5}} = 0,55 \text{ Sekunden}.$$

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen, welche im Falle der Transversalschwingungen = 8,6 m/sec gefunden wurde, ergibt sich hier größer, denn es ist

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{2l}{T} = \sqrt{\frac{E}{d}},$$

somit $v = 12,7$ m/sec.

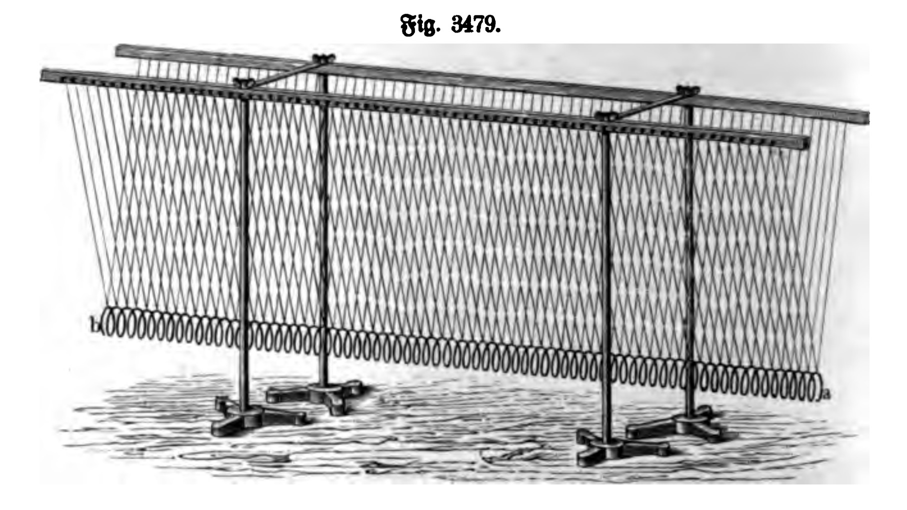
Richarz (Z. 15, 290, 1902) empfiehlt eine 6 m lange Spiralfeder, bestehend aus Stahldraht von 34 m Länge, 1,5 mm Dicke, mit 115 Windungen von 9 cm Durchmesser. Da das einmalige Durchlaufen der Spirale etwa eine Sekunde erfordert, lassen sich alle aufeinander folgenden Phasen der Bewegung bequem verfolgen. Sehr schön ist zu erkennen, daß eine nach oben fortschreitende Verdichtung am festen Ende als Verdichtung, dagegen am freien unteren Ende als Verdünnung reflektiert wird, während eine nach oben fortschreitende Verdünnung oben als Verdünnung, unten als Verdichtung zurückgeworfen wird.

Bei der Wellenmaschine von Weinhold ist eine etwa 70 cm lange Kupferdrahtspirale horizontal aufgehängt, so daß jede Windung wie die Kugel eines einfachen Pendels von einem Doppelfaden getragen wird (Fig. 3479 Lb, 75).

Mach benutzt eine Reihe massiver Metallcylinder, welche durch ringförmige Stahlfedern miteinander verbunden sind und auf einer glatten Holzbahn ruhen. Stößt man gegen den ersten Cylinder, so sieht man den Stoß deutlich durch die ganze Reihe fortschreiten. Stößt die Welle gegen ein Hindernis, so kann man hier deutlich auch die Reflexion erkennen.

Oosting (Z. **13**, 214, 1900) **empfiehlt Kautschukfäden zu verwenden, welche am einen Ende durch einen Elektromotor (Motorunterbrecher für Induktorium)** in Schwingung versetzt werden. **Über zwei parallele Fäden werden Kartonstreifen** (10 cm lang, 4 mm **breit) in Entfernungen von 25 cm mit Nähgarn an die Fäden** festgemacht. **Letztere haben quadratischen Querschnitt von 2 mm Seite.** Die Länge im gespannten Zustande beträgt 400 cm. **Versetzt man das eine Ende** in Longitudinalschwingungen, **so kann man sehr schön an der Bewegung der Kartonstreifen die Lage der Schwingungsbäuche und Knotenpunkte erkennen.**

Fig. 3479.



605. Wellenmaschinen für Longitudinalwellen. **Bei Machs Wellenmaschine** (Fig. 3408, S. 1331) verfährt man in folgender Weise:

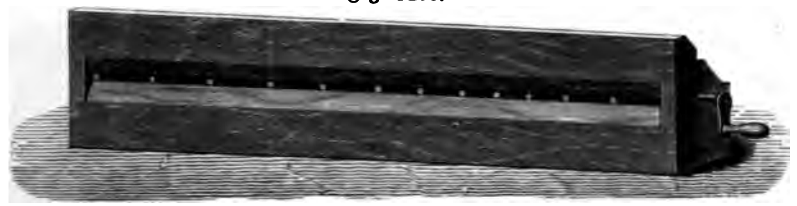
Fortschreitende Longitudinalwelle. **Die Schwingungsebene wird** parallel zu *cd* gestellt und der Schieber *s* wird an der Leiste *ef* gleichmäßig hingeschoben. Hierbei nimmt er jede Kugel ein Stück mit und alle machen sodann die gleiche Schwingung, nur eine nach der anderen. Das Fortschreiten der Verdichtungen und Verdünnungen, sowie die übrigen Eigenschaften der Longitudinalwelle zeigen sich hierbei sehr auffallend.

Stehende Longitudinalwelle. Die Leiste *st* wird auf die Vorsprünge *pg* gelegt und die Kugeln erhalten durch die Drahtstifte die größten Exkursionen, welche ihnen in einer stehenden Longitudinalwelle zukommen. Zieht man die Leiste *st* zurück, so werden alle Kugeln gleichzeitig ausgelöst. Auch die Schwingungsweisen in Stäben, Saiten, Pfeifen mit einem oder mehreren Knoten lassen sich anschaulich machen. Man entfernt hierbei die überflüssigen Pendel, indem man die Schnüre um *cd* herumschlingt.

Ein älterer, gleichfalls recht praktischer Apparat ist der in Fig. 3480 abgebildete Wheatstonesche Apparat. Derselbe besteht aus einem geschwärzten hölzernen Kasten, der auf der Vorderseite einen etwa 1 cm weiten Schlitz hat; gegen diesen Schlitz ist das Holz des Kastens abgeflacht; oben ist der Kasten offen. In diesen Kasten legt man eine hölzerne Walze, deren Achse parallel und in gleicher Höhe liegt mit dem Schlitze. Die Walze muß so groß sein, daß sie an dem Schlitze beinahe anliegt; man läßt dieselbe etwa 1 m lang und 15 bis 18 cm dick machen. Wenn man sie nur 1 dm dick nimmt, so zeigen die weißen Striche im Schlitze ein starkes Hin-

erneigen, da man den Schlitz nicht wohl enger machen kann, als oben an-
n ist, wenn die weißen Punkte in einem größeren Auditorium gesehen werden
Die Walze wird aus mehreren Stücken gut ausgedörrten Holzes zusammen-
t und es ist gut, dieselbe, ehe sie ganz fertig gedreht wird, wieder einige

Fig. 3480.



1 liegen zu lassen. Eine hohle Walze hält sich besser als eine massive. Die
erhält einen Überzug von Papier, der eine Röhre bildet, welche nur auf die
gestreift wird, um damit wechseln zu können. Fig. 3481 zeigt einen solchen
g, der über die
gekrümmt und
1 Rändern *ab* —
einigt wird. Be-
sich dieser Über-
ıf der Walze und
oird in der Rich-
ca gedreht, so
jeder der dicken
1 Striche — die
n dienen nur zur
uktion und wer-
nachher schwarz
ichen — einen
1 Punkt im Schlitze
kastens, welcher
ıd der Umdrehung
r Richtung des
s hin und her
vährend die Ver-
g selbst in der
ıg *ab* fortschreitet.
e hier nur eine
jtung und Ver-
ıg auf die ganze
gezeichnet ist, so
man auf einen

Fig. 3481.

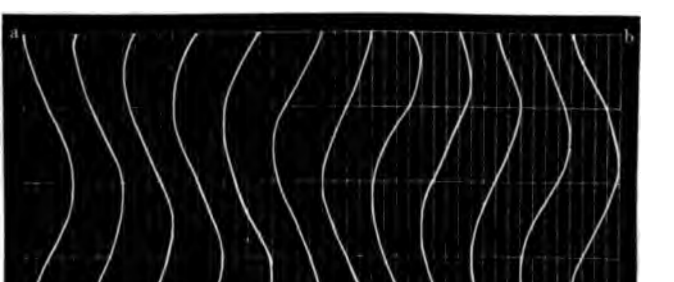
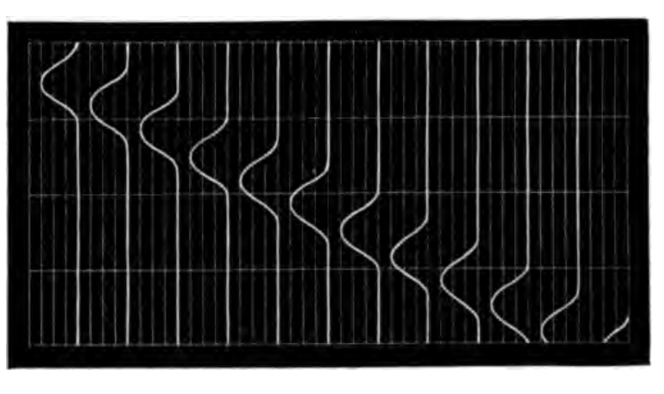
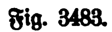


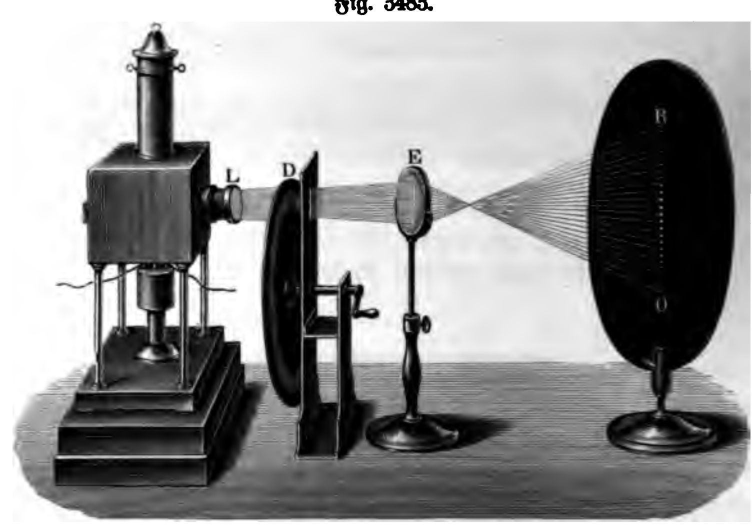
Fig. 3482.



1 Überzug zwei Wellen aufzeichnen, so daß die eine Verdichtung am Ende
ie zweite in der Mitte beginnt. Fig. 3482 zeigt den ideellen Fall, wo ein
lchen nur einen Hin- und Hergang macht und dann wieder zur Ruhe kommt.
ıderen Papierrollen kann man die Verdichtung und Verdünnung in einer ge-
Pfeife von $^1/_4$ Wellenlänge u. s. w. auftragen.

Bei der Wellenmaschine von Pierre (1861) besteht die Walze aus einzelnen Abschnitten, von welchen jeder nur eine Kurve enthält und die, mit Ausnahme des ersten, nur lose auf der Achse sitzen. Innen besitzt jeder einen Zahn, dem ein Zahn auf der Achse entspricht, so daß er, wenn die Zähne sich fassen, mitgenommen wird. Die Zähne sind nun derart gegeneinander verstellt, daß in regelmäßigen Intervallen


Fig. 3483.



ein Abschnitt nach dem andern mitgenommen wird. Die Kurven sind vertieft und vermöge eines eingreifenden Zapfens bewirken sie die Verschiebung parallelepipedischer Holzkörper, wodurch die Erscheinung auffallender wird, als wenn sich nur Punkte verschieben.

Fig. 3484.



Fig. 3485.



Stöhrers Projektionswellenmaschine (Fig. 3484, S. 40), für das Skioptikon bestimmt, ist ganz ähnlich der von König beschriebenen (Fig. 3483) konstruiert. Auf kreisförmige, geschwärzte Scheiben sind durchsichtige Wellenlinien verzeichnet. Steht eine solche Scheibe vor einem Spalt und sendet man durch diesen Licht nach einem Schirm, so entsteht darauf eine Reihe in einer Linie (der Richtung des Spaltes) angeordneter heller Punkte, welche den Kreuzungsstellen von Spalt und Wellenlinien entsprechen, da nur durch diese Licht durchdringen kann. Rotiert die Scheibe, so kommen entsprechend der Form der Wellenlinien die Lichtpunkte in oscillierende Bewegung. Die dem Apparate beigegebenen Kreisscheiben demonstrieren folgendes: 1. die Reflexion eines elementaren Stoßes in einer beiderseits geschlossenen Röhre; 2. eine fortschreitende Longitudinalwelle; 3. die Luftbewegung in einer beiderseits offenen Röhre, welche ihren Grundton gibt, und 4. die in einer einerseits geschlossenen Röhre, welche den ersten Oberton (die Duodecime des Grundtons) gibt. Zur Darstellung der Reflexion einer einzelnen Welle am geschlossenen und offenen Ende einer Röhre sind außerdem noch zwei rechteckige Platten mit Wellenlinien beigegeben (Fig. 3485).

Weinhold hat die Wellenlinien der Stöhrerschen Apparate verbessert und rch einfache exzentrische Kreise ersetzt (Fig. 3486 Lb, 40).

Eine Projektions-Wellenmaschine, welche zugleich longitudinale und transversale ellen erzeugt, zeigt Fig. 3487 Lb, 50.

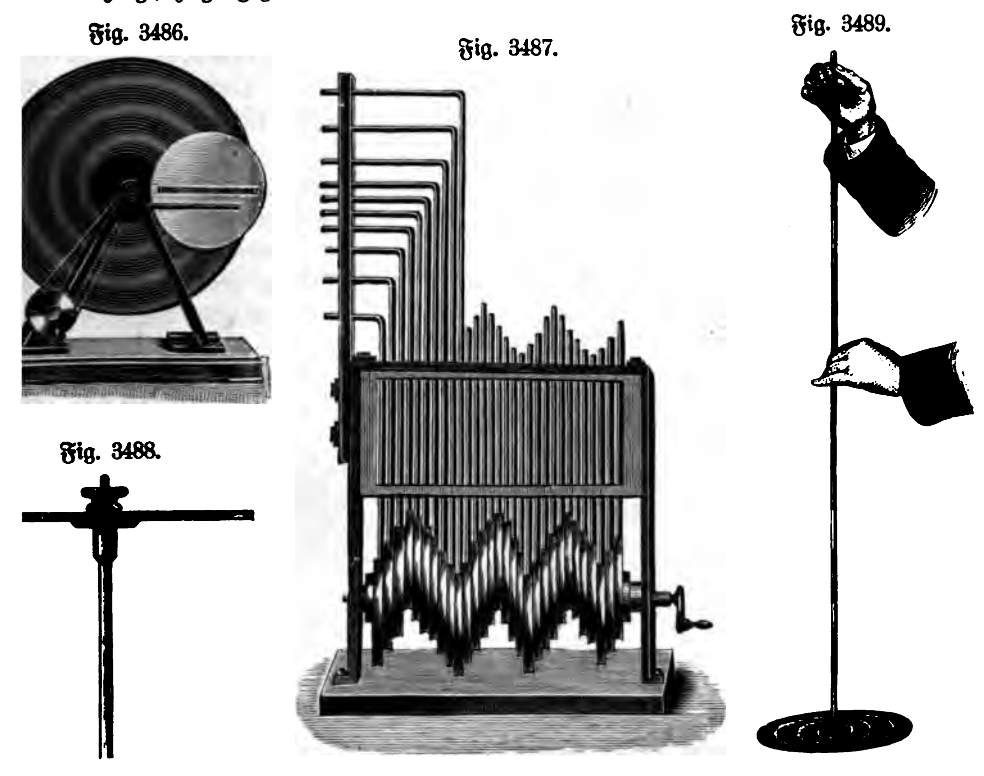


Fig. 3486. Fig. 3487. Fig. 3489. Fig. 3488.

606. Longitudinalschwingungen von Stäben weist man dadurch nach, daß im stande sind, in einem anderen Körper Querschwingungen zu erzeugen. :nutzt man eine kreisrunde Messingatte von 1,5 bis 2 cm Durchmesser, in ren Mitte ein 9 bis 12 dm langer und bis 3 mm dicker Stahlstab eingelötet, er wie in Fig. 3488 angeschraubt ist, lt den Stab in der Mitte wie in g. 3489, streut Sand auf die Platte id reibt die obere Hälfte mit beharzten ngern, so erhält man undurchschnittene nzentrische Kreise als Klangfiguren.

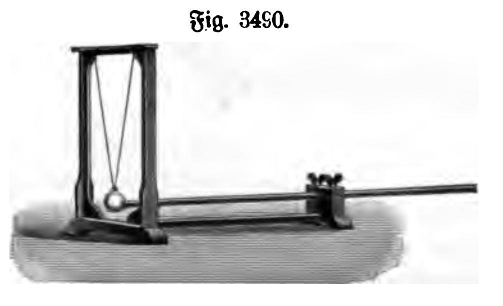


Fig. 3490.

Man kann auch das Ende eines horizontal in der Mitte befestigten Stabes gen eine pendelartig aufgehängte Elfenbeinkugel stoßen lassen (Fig. 3490, Lb, 33). chwingt der Stab, so wird die Kugel immer abgestoßen, wenn sie ihn berührt.

An Stelle eines Stabes kann man nach Zellner[1]) auch einen Faden betzen, welcher, wie aus der Fig. 3491 zu ersehen, durch eine Stimmgabel Longitudinalschwingungen versetzt wird. Die Schwingungen werden auf eine

[1]) Zellner, Vorträge über Akustik, Wien 1902, Hartleben, 1, 407.

Scheibe übertragen, welche durch ein an drei Schnüren hängendes Gewicht in horizontaler Lage gehalten wird.

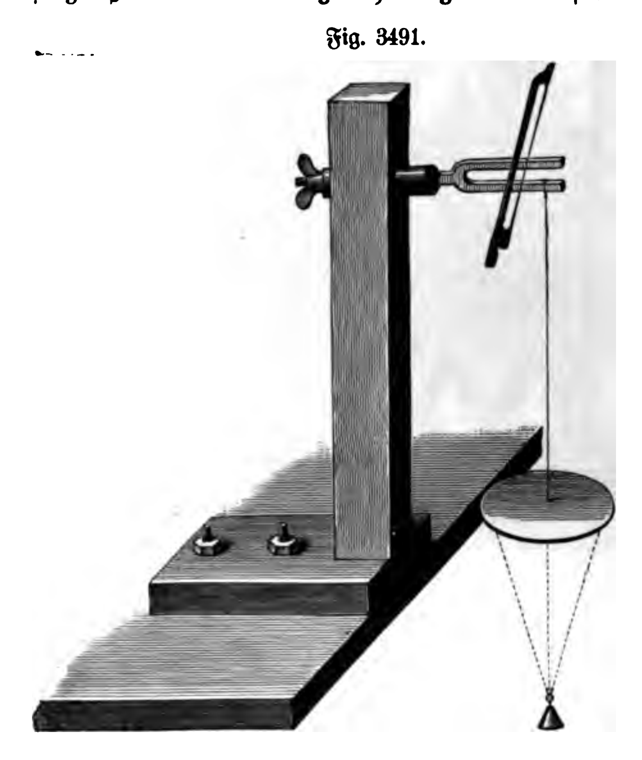
Die Schwingungszahl ergibt sich nach S. 1365 aus der Formel

$$T = 2l\sqrt{\frac{d}{E}} \text{ Sekunden.}$$

Sie ist also unabhängig von der Dicke des Stabes, steht aber in umgekehrtem Verhältnisse zu der Länge und der Quadratwurzel aus dem spezifischen Gewicht und in geradem Verhältnisse zu der Wurzel aus der Elastizität.

Die Schwingungszahl eines an einem Ende festen Stabes ist halb so groß wie bei einem gleich langen beiderseits festen oder freien Stabe. Schwingt ein solcher Stab mit Knoten, so muß das freie Ende immer ebenfalls ein Bauch sein; das frei schwingende Endglied ist also nur eine halbe Welle, der letzte Knoten liegt um $\frac{1}{3}, \frac{1}{5}, \frac{1}{7} \ldots$ der Stablänge von dem freien Ende entfernt; die Wellen sind 3-, 5-, 7- ... mal kürzer als für den ganzen Stab, die Schwingungszahl also 3-, 5-, 7- ... mal größer als die der Grundschwingung. Ein an einem Ende freier, am anderen Ende fester Stab gibt also nur die ungeradzahligen Oberschwingungen, während ein beiderseits freier oder beiderseits fester Stab alle Oberschwingungen erzeugen kann. Bei demselben Stab verhält sich die Zahl der longitudinalen Schwingungen zu derjenigen der transversalen wie die Länge des Stabes zur $3\frac{1}{2}$ fachen Dicke desselben, wenn hierbei der Stab an einem Ende fest ist. Doch ist leicht ersichtlich, daß man Stäbe herstellen kann, deren Längs- und Querton von derselben Höhe ist; von solchen Stäben hat Terquem (1858) nachgewiesen, daß beide Töne immer gleichzeitig auftreten.

Fig. 3491.



Da $v = \frac{2l}{T} = 2ln$, kann man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Stäben ermitteln, falls n etwa ähnlich wie bei der schreibenden Stimmgabel ermittelt ist. Es ist aber auch $v = \sqrt{\frac{E}{d}}$, läßt sich also aus Elastizitätsmodul und Dichte berechnen. Beispielsweise ist für Eisen $E = 20000 . 10^6$ kg pro Quadratmeter, $d = 7800 : 9{,}81 = 795$ Hyl pro Cubikmeter, somit

$$v = \sqrt{\frac{20\,000\,.\,10^6}{795}} = 5020 \text{ m}.$$

Ist die Schwingungszahl bestimmt, so kann man auch den Elastizitätsmodul berechnen, denn wenn s das spezifische Gewicht, ist

$$E = \frac{v^2 s\,.\,10^3}{9{,}81} = \frac{4 n^2 l^2 s\,.\,10^3}{9{,}81} \text{ kg pro Quadratmeter.}$$

Beispielsweise war für einen Eisenstab $l = 1{,}361$ m, $n = 1843$, $s = 7{,}61$, somit

$$E = \frac{4\,.\,1843^2\,.\,1{,}361^2\,.\,7{,}61\,.\,10^3}{9{,}81} = 19\,520\,.\,10^6 \text{ kg pro Quadratmeter.}$$

607. Kombinierte Schwingungen. Wird in ein Glasrohr (Fig. 3492 K, 27) ein schief abgeschnittener Kork lose eingeschoben und das Glasrohr durch Reiben in

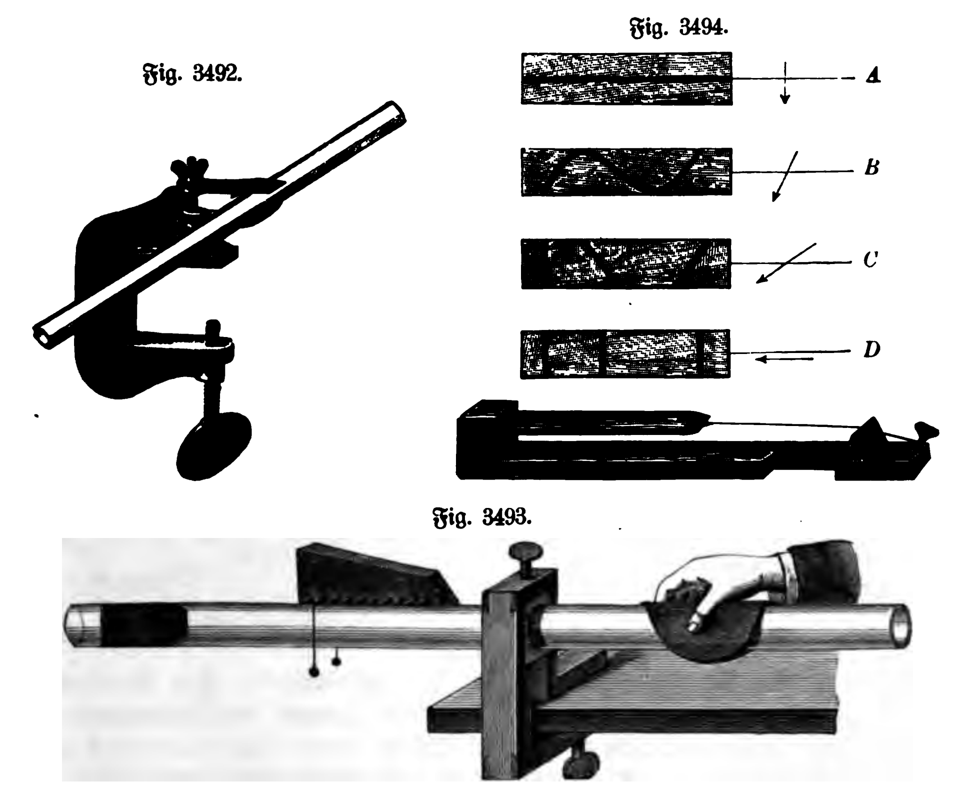


Fig. 3492. Fig. 3494. Fig. 3493.

longitudinale Schwingungen versetzt, so verschiebt sich der Kork, je nachdem, in der einen oder anderen Richtung, weil neben den longitudinalen auch transversale Schwingungen auftreten. Noch besser eignet sich ein Kork mit sägeartigen Zähnen, welcher eventuell auch einfach auf das Rohr als Reiter aufgesetzt werden kann[1]) (Fig. 3493).

Würde die Röhre bloß longitudinal schwingen, so könnte der Kork nicht von der Stelle rücken. Daß ihn Querschwingungen bewegen, rührt daher, daß er in

[1]) Zellner, a. a. O., S. 389.

die Höhe geschleudert wird und beim Zurückschwingen der Longitudinalbewegung außer Berührung mit dem Glas ist, also immer nur von einer gleichgerichteten Längsschwingung erfaßt und weitergeschoben wird.

Der Apparat Fig. 3494 (Lb, 8) ermöglicht, den Einfluß der Richtung der Bewegung des streichenden Violinbogens (Pfeile in *A*, *B*, *C*, *D*) auf die Form der Knotenlinien der durch die Saite in Mitschwingung versetzten rechteckigen Holzlamelle zu zeigen.

Fig. 3495.

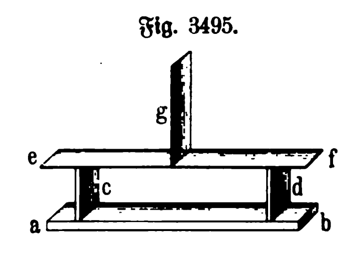
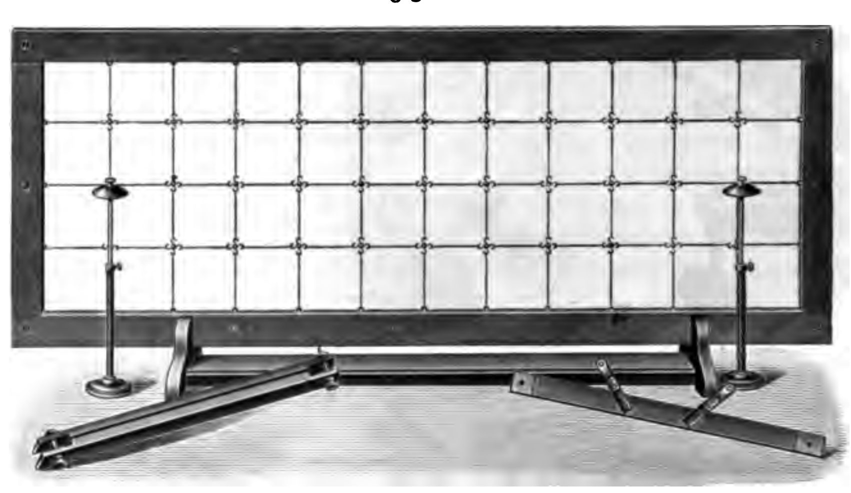


Fig. 3495, aus Glasstreifen zusammengekittet, gibt beim Reiben von *g* Klangfiguren auf *ef* oder um 90° gedreht beim Anstreichen von *ef* mit dem Violinbogen Klangfiguren auf *g*.

608. Wellen in ausgedehnten Medien. Ein elastisches Gitter, an welchem die Ausbreitung von Wellen verfolgt werden kann, ist dargestellt in Fig. 3496 (K, 60) nach **Hillig** (Z. 17, 329, 1904). Es besteht aus einem Holzrahmen von 1,5 m × 0,5 m, in welchem leichte Spiralfedern in gleichen Abständen

Fig. 3496.



voneinander kreuzweise gespannt sind. An den Schnittpunkten sind kleine Bleikügelchen von 1 cm Durchmesser angebracht. Zum Nachweis der Ausbreitung von Wellen dienen zwei verstellbare Glocken auf Stativ, ferner eine doppelte und zwei einfache Klemmleisten. Zur Darstellung verschiedener Medien werden einzelne Kugeln mit Wachs beschwert.

Man kann zunächst zeigen, daß nur eine Art Longitudinalwellen möglich ist, Transversalwellen dagegen von verschiedenster Schwingungsrichtung; ferner die Reflexion der Wellen (die Glocke wird in die Mitte gestellt, jedesmal, wenn die Welle vorbeikommt, wird sie angeschlagen).

Zur Erzeugung **stehender Wellen** wird die links abgebildete Klemmleiste so auf den Rahmen geschraubt, daß sie die dritte Vertikalreihe verdeckt. Man drückt sie mit der linken Hand leicht zusammen, so daß sie die Kügelchen gerade berührt. Dieselbe Leiste kann auch zur Demonstration der **Polarisation** dienen, da der

Schlitz nur Schwingungen durchläßt, die zu demselben parallel sind. Die einfachen Klemmleisten ermöglichen Demonstration der **Beugung**[1]).

Fig. 3497 (Lb, 12) zeigt einen Apparat zur Projektion der konzentrischen Ausbreitung der Wellen.

Stöhrer liefert einen auf die Schwungmaschine aufzusetzenden Wellenapparat zu gleichem Zweck (Fig. 3498) zum Preise von 22 Mark.

Fig. 3497.

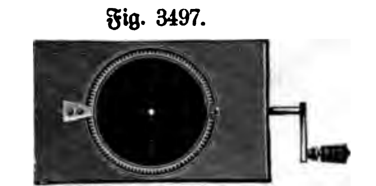


Fig. 3498.

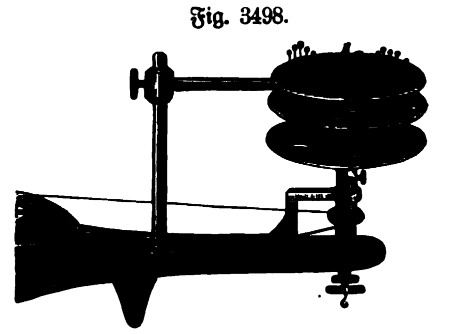
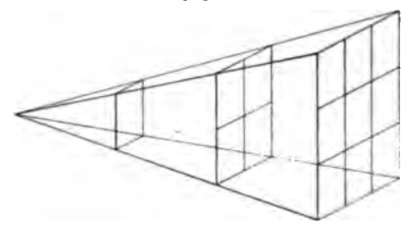


Fig. 3499.



Da bei der Ausbreitung die Energie erhalten bleibt, also, wie man an einem Drahtmodell, wie Fig. 3499, demonstrieren kann, die Energiemenge, die im Abstand 1 m vom Erregungszentrum auf 1 qm trifft, im Abstand 2 m auf 4 qm fällt, im Abstand 3 m auf 9 qm, so ist die **Intensität** der Wellenbewegung, d. h. die auf 1 qm entfallende Energiemenge im Abstand 2, 3 ... nur 1/4, 1/9 ... derjenigen im Abstand 1, d. h. die Intensität ist umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes.

Da die Energie proportional dem Quadrate der Amplitude, so nehmen die Amplituden umgekehrt proportional dem Abstande ab[2]).

Als **Wellenfläche** bezeichnet man den geometrischen Ort der Punkte, an welchen die Wellenbewegung nach Ablauf einer Sekunde angelangt ist. Für isotrope Medien ist dieselbe eine Kugel. Sie ist größer für die longitudinalen als für die transversalen Wellen.

Beispielsweise sind die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in Meter-Sekunden[3]):

Art der Wellen	Eisen	Stahl	Messing	Lithographenstein	Opal
Longitudinal . . .	4310	5560	3620	5150	3840
Transversal . . .	2560	3180	2090	2980	2600

Ein Modell zur Erläuterung der Änderung der Fortpflanzungsrichtung bei Reflexion zeigt Fig. 3500 (Lb, 25).

[1]) Ähnlich wie oben (§ 579) eine Serie gewöhnlicher Pendel zur Erläuterung der Fortpflanzung von Seilwellen benutzt wurde, könnte man auch zwei, drei... miteinander verbundener Pendelserien benutzen, um die Ausbreitung der Wellen in einer Fläche zu erläutern, insbesondere den Umstand, daß im allgemeinen stets longitudinale und transversale Wellen gleichzeitig auftreten. — [2]) Bei der Ausbreitung in einer Ebene wären die Amplituden umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus dem Abstande. — [3]) Diese Fortpflanzungsgeschwindigkeiten stimmen nicht genau überein mit denjenigen in Stäben, wobei z. B. im Falle der Dehnung gleichzeitig Querkontraktion eintritt, somit reine Longitudinal- und Transversalwellen nicht möglich sind.

Im allgemeinen ist die Erscheinung aber nicht so einfach, wie sie das Modell darstellt, da bei Reflexion einer Longitudinalwelle gleichzeitig eine reflektierte Transversalwelle entsteht und umgekehrt, und das einfache Reflexionsgesetz, $i = r$ (Fig. 3501),

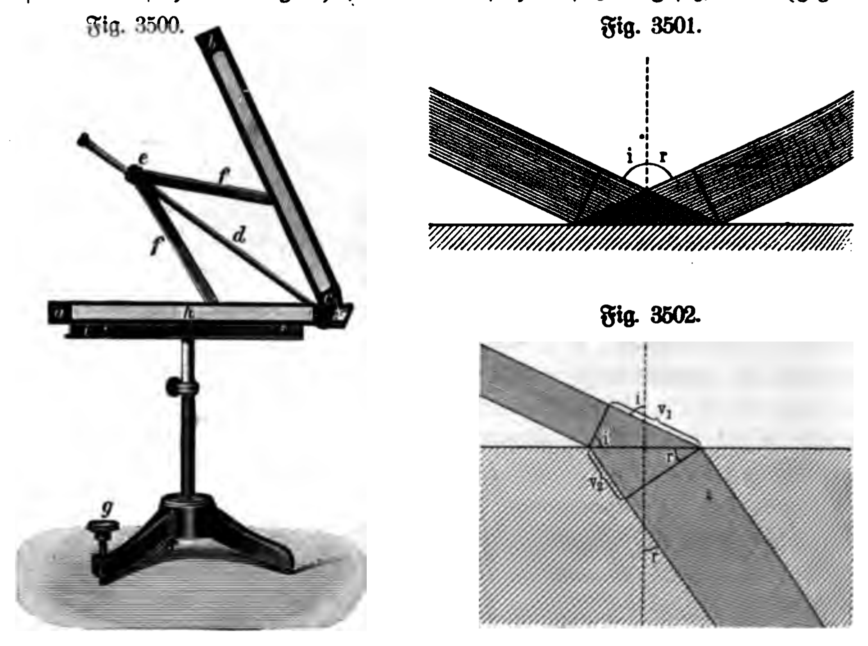
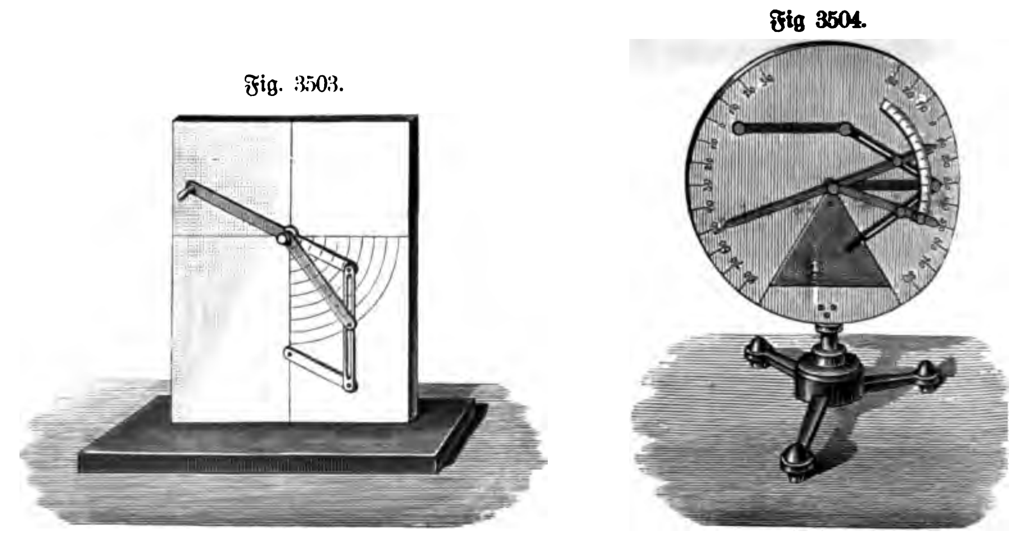


Fig. 3500. Fig. 3501. Fig. 3502.

welches sich aus dem Huygens'schen Prinzip ergibt, nur für die gleichartigen reflektierten Wellen zutrifft. Bei Reflexion an einem dichteren Mittel geht ebenso wie bei Reflexion an einem befestigten Seilende eine halbe Welle verloren.


Fig. 3503. Fig. 3504.

Bei Reflexion einer transversalen Welle gibt es einen Grenzwert des Einfallswinkels, für welchen die reflektierte longitudinale Welle streifend wird. Für noch größere Einfallswinkel gibt es dann nur noch die reflektierte transversale Welle[1]).

[1]) Siehe Riecke, Lehrbuch d. Physik, 2. Aufl. 1, 254. Leipzig 1902.

Das Brechungsgesetz ergibt sich ebenso wie das Reflexionsgesetz aus dem Huygensschen Prinzip, insofern $\sin i : \sin r = v_1 : v_2$, d. h. gleich dem Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, also konstant sein muß (Fig. 3502). Dieses Verhältnis ist der **Brechungsquotient**.

Reusch konstruierte zur Erläuterung das Modell Fig. 3503 (Dr. Houdek und Hervert, Prag, 10 fl.); **Pfaundler**, um die Abhängigkeit des Austrittswinkels vom Eintrittswinkel bei einem Prisma zu demonstrieren, das Modell Fig. 3504 (desgl. 20 fl.).

Bei der Brechung an der Grenze gegen ein Medium mit größerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit [1]) kann die Welle streifend gebrochen werden. In diesem Fall ist $r = 90°$, d. h. $\sin r = 1$, somit $\sin i = v_1/v_2$. Ist der Einfallswinkel größer als dieser sog. **Grenzwinkel**, so tritt kein gebrochener Strahl mehr auf, die gesamte Energie ist in dem reflektierten Strahl enthalten, man hat den Fall der **Totalreflexion**.

Ebenso wie bei der Reflexion bilden sich auch bei der Brechung im allgemeinen eine longitudinale und eine transversale gebrochene Welle, von welchen nur die der einfallenden Welle gleichartige dem Brechungsgesetz folgt.

Zu berücksichtigen sind diese Verhältnisse insbesondere bei dem Verlauf der **Erdbebenwellen**, die man sich ausgehend denkt von dem sog. **Hypozentrum**, einem Punkt, der in großer Tiefe (z. B. 300 km) unter dem **Epizentrum** liegt, dem Punkt, von welchem die Wellen an der Erdoberfläche auszugehen scheinen. Nach ein und demselben Orte können Stoßwellen direkt gelangen oder auch nach ein- oder mehrmaliger Reflexion an der Erdoberfläche. Im allgemeinen machen sich die Wellen nur an der Erdoberfläche, nicht in der Tiefe (z. B. in Bergwerken) fühlbar, ebenso wie bei dem Stoßapparat, Fig. 3298, S. 1286, nur die letzte Kugel der Reihe fortgeschleudert wird, während die in der Mitte befindlichen sich nicht merklich verschieben.

Diejenigen Erdbebenwellen, die direkt durch die Erde zu den Antipoden sich fortpflanzen, werden durch den dichteren Erdkern ähnlich wie Lichtstrahlen durch eine Linse gebrochen, so daß genauere Messungen hierüber, wie sie von der internationalen Erdbebenkommission vorgenommen werden [2]), vielleicht einmal dazu führen werden, näheren Aufschluß über die Beschaffenheit des Erdinnern zu erlangen.

Ein Modell, welches annähernd den Gang der Strahlen in Linsen darstellt, hat W. **Neu** (1885) angegeben. Auf einem Brette von 120 cm Länge und 30 cm Breite ist in der Mitte der Durchschnitt einer Linse nebst deren Hauptachse und den beiden Brennpunkten a und a_1 gezeichnet (Fig. 3505; $ao = oa_1 = 20$ cm,

---

[1]) Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit hängt zusammen mit dem Elastizitätsmodul, d. h. der **Kapazität** für Spannungsenergie und der Dichte des Materials, d. h. dem Trägheitswiderstand oder Widerstand der **Selbstinduktion**. Man kann schon hier diese Bezeichnungen gebrauchen, um die Analogie mit der Brechung elektromagnetischer Wellen hervortreten zu lassen. — [2]) Zur Feststellung der Erschütterungen dienen **Seismometer**, entweder große gewöhnliche Pendel oder **Horizontalpendel**. Letztere würden vollkommen getreu die Verschiebungen anzeigen bei völlig vertikaler Stellung der Achse. Dann hätte man aber keinen festen Nullpunkt, da z. B. schon durch Temperaturänderungen, Winddruck u. s. w. geringe Änderungen der Richtung der Erdoberfläche hervorgebracht werden, die ein völliges Umschlagen des Pendels bewirken würden. Man gibt deshalb der Achse eine geringe Neigung und macht die Pendelbewegung aperiodisch durch eine geeignete Dämpfung, z. B. Luftdämpfung. Ein neues **Seismometer** nach **Wiechert** liefern **Spindler u. Hoyer**, Göttingen. (Vgl. a. S. 1223 und 1310, Anm. 2.)

ob = 8 cm). Im Punkte *b* ist ein Stift befestigt, um welchen sich der gebrochene Metallstab (dünne Messingröhre) *dbe* drehen kann. Hat derselbe die Lage *abc*, so stellt er dar, daß ein vom Brennpunkte *a* ausgehender Strahl nach der Brechung der Achse parallel verläuft. Würde man ihn so drehen, daß der Schenkel *bc* durch a_1 ginge, so würde der Fall gezeigt werden, daß ein ursprünglich der Achse paralleler Strahl nach der Brechung durch den Brennpunkt a_1 geht. In der Lage *dbe* zeigt er die Lage der konjugierten Punkte *d* und *e* auf dem Hauptstrahl *doe*. (Fig. 3506 E, 36, und Fig. 3507 K, 35.)

Fig. 3505.

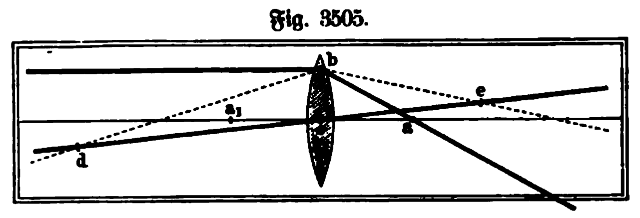


Fig. 3506.

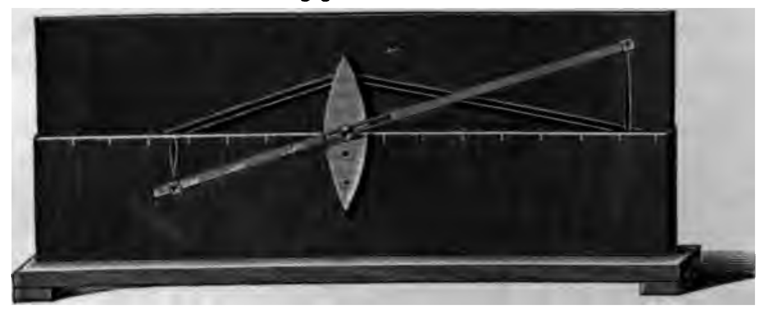


Fig. 3507.

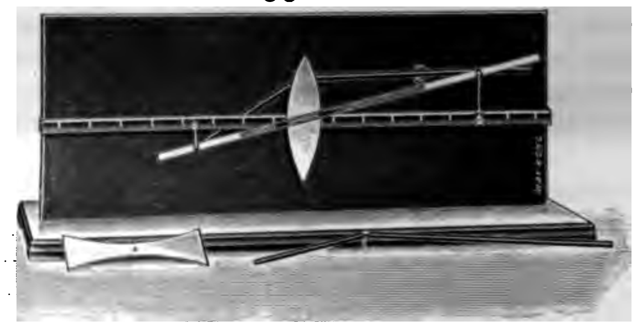


Fig. 3510.

Fig. 3509.



Zur Erläuterung der Doppelbrechung kann man zunächst an Modellen des Rotationsellipsoids und des dreiachsigen Ellipsoids die Verteilung der Werte der Elastizität in ein- und zweiachsigen Kristallen erläutern; an einem Pappdeckel, welcher so ausgeschnitten ist, daß er sich in bestimmter Richtung über nie

solches Ellipsoid schieben läßt, die Bedeutung der Schnittellipse erklären, d. h. daß eine beliebig gerichtete Bewegung sich in zwei senkrecht zueinander polarisierte Komponenten parallel der Richtung der größten und der kleinsten Achse dieser Ellipse zerlegt, welche mit verschiedener Geschwindigkeit fortschreiten und deshalb nach bestimmter Zeit auf verschiedenen das Erregungszentrum umgebenden sog. Wellenflächen (Fig. 3508 Lb, 8; Fig. 3509 Lb, 8; Fig. 3510 Lb, 15) angekommen sind [1].

Zur Erzeugung einer Wellenbewegung ist Energie erforderlich, welche mit der Wellenbewegung im Raume fortschreitet und somit durch dieselbe nach einem anderen Orte übertragen werden kann.

Als Intensität der Wellenbewegung bezeichnet man die Energiemenge, welche in einem Cubikmeter enthalten ist.

Die Intensität einer fortschreitenden elastischen Welle beträgt, wenn ϱ die Dichte (die Dichte, wenn 1 cbm g kg wiegt, = 1 gesetzt) bedeutet:

$$J = 2\varrho \cdot \frac{A^2 \pi^2}{T^2} \cdot 10^{-6} \text{ Kilogrammeter pro Cubikmeter;}$$

diejenige einer stehenden Welle ist halb so groß.

Um die Intensität einer Strahlung experimentell zu bestimmen, müßte man sie auf einen Körper auftreffen lassen, welcher sie vollständig zu dämpfen (absorbieren) vermag. Die entstehende Wärmemenge wäre dann äquivalent der von der Strahlung mitgebrachten Energiemenge, man hätte dieselbe somit nur mit 430 zu multiplizieren und durch das Volumen der während der Beobachtungszeit vom Körper aufgenommenen Strahlung zu dividieren, um die Anzahl Kilogrammeter pro Cubikmeter, d. h. die Intensität zu finden.

609. Gedämpfte fortschreitende Wellen. Man legt nach Volkmann eine lange Stahldrahtspirale auf den Tisch oder den Fußboden und bewegt das eine Ende in gleichmäßigem Tempo hin und her. Die sich ergebende fortschreitende Welle ist infolge der Reibung gedämpft, die Ausbiegungen erscheinen somit um so kleiner, je weiter sie von Anfang an entfernt sind.

Die Dämpfung von Wellen in ausgedehnten Medien wird als Absorption der Wellen bezeichnet. Sie tritt z. B. ein bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze, der inneren Reibung wegen, indes ist ein Reibungswiderstand (elastische Hysteresis, elastische Nachwirkung) auch schon unterhalb der Elastizitätsgrenze zu beobachten.

Zehntes Kapitel.

Hydrodynamik.

610. Wirkungen der Zentrifugalkraft. Während die Bewegung der festen Körper sich im allgemeinen so vollzieht, als ob sie starr wären und nur in ver-

[1] Ich demonstriere hier auch große Modelle, welche die Änderung der Wellen beim Eintritt in eine Kristallplatte, die Anwendung des Huygensschen Prinzips zur Ableitung der Doppelbrechung, das Verhalten einer Kristallplatte bei gekreuztem Polarisator und Analysator u. s. w. darstellen, wie sie später im Kapitel „Strahlung" näher besprochen werden.

hältnismäßig wenigen Fällen, wie z. B. pechartig weichen Körpern, fließenden Kristallen u. s. w. auf die Formänderungen unter dem Einfluß des Bewegungszustandes Rücksicht genommen werden muß, ist bei der Bewegung von Flüssigkeiten gerade die außerordentlich hohe Plastizität das Charakteristische, und als Gegenstück zu den starren Körpern pflegt man als **ideale Flüssigkeiten** solche zu bezeichnen, die keine merkliche Zähigkeit, aber auch keine Volumelastizität besitzen, letzteres im Gegensatz zu den Gasen, deren Volumelastizität geradezu als das Charakteristikum ihres Zustandes (im idealen Fall) betrachtet wird.

Die Plastizität der Flüssigkeiten kommt bei den Bewegungserscheinungen in zweierlei Art in Betracht; einesteils insofern sie bedingt, daß sich die Flüssigkeiten während der Bewegung stets den Gefäßwänden anschmiegen, anderenteils insofern Oberflächen, welche nicht durch Gefäßwände begrenzt sind, infolge der durch den Bewegungszustand selbst hervorgerufenen Kräfte fortwährend ihre Gestalt ändern, was mit entsprechenden Strömungen im Inneren der Flüssigkeit verbunden ist.

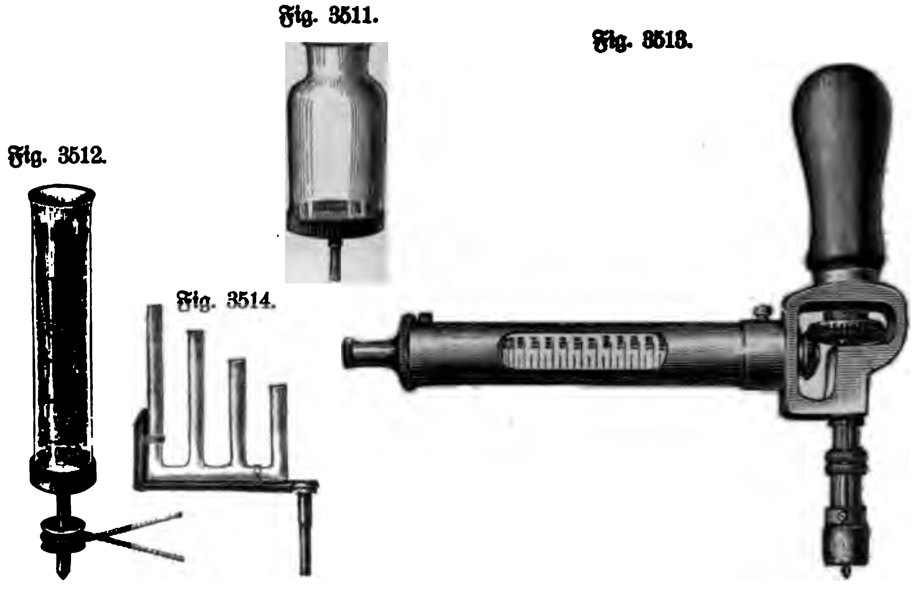


Fig. 3511. Fig. 3513. Fig. 3512. Fig. 3514.

Setzt man ein cylindrisches Glas, wie Fig. 3511 (E, 6), halb mit Wasser gefüllt auf die Schwungmaschine und dreht mit steigender Geschwindigkeit, so sinkt der Flüssigkeitsspiegel, da sich die Oberfläche paraboloidisch gestaltet, in der Mitte immer tiefer herunter. Man könnte somit eine am Gefäße oder an einem dahinter befindlichen vertikalen Stab angebrachte Skala so eichen, daß die Senkung des Flüssigkeitsspiegels darauf direkt die Winkelgeschwindigkeit oder Tourenzahl der Achse abzulesen gestattet. Hierauf beruht das Gyrometer von **Braun** (Fig. 3512), bei welchem als Flüssigkeit verdünntes Glycerin dient [1]).

[1]) Zu beziehen von **Richard Grabenwitz**, Mechan. Werkstatt und Apparate-Bauanstalt, Berlin S. (Fig. 3513), Preis 90 bis 1008 Mk. und von **E. Sonnenthal** jun., Berlin C., Neue Promenade 6, zu 50 bis 75 Mk. Über einen „**Zentrifugalsauger**" als Geschwindigkeitsmesser siehe **Prytz**, Zeitschr. f. Instrumentenkunde **11**, 393, 1891. Ein ähnliches Tachometer ist bei den Milchzentrifugen von **L. Stieger** in Frankfurt a. M. (Fig. 3229, S. 1243) angebracht. Man kann auch in die Mitte des rotierenden Gefäßes einen Heber einsetzen, dessen anderes Ende als Manometer gestaltet ist.

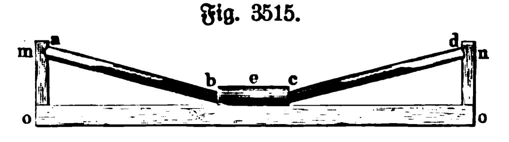
Das gleiche Prinzip findet Anwendung bei dem Heberschwung nach August, Fig. 3514 (Lb, 7). Eine Reihe kommunizierender Röhren wird mit Hilfe der Schwungmaschine in Rotation versetzt. In den äußeren steigt das Wasser, in denjenigen, die dem Mittelpunkt nahe sind, fällt es.

611. Bifluidtachometer. Denkt man sich bei dem Braunschen Gyrometer das Glycerin durch Quecksilber ersetzt und in der Mitte in dieses eine Glocke eingetaucht, welche nach oben in eine enge Röhre ausläuft und mit gefärbtem Glycerin gefüllt ist, so wird ähnlich wie bei dem Indexmanometer oder -barometer (S. 903, Fig. 2555) eine geringe Verschiebung des Quecksilberspiegels eine bedeutende Änderung der Glycerinsäule zur Folge haben.

Auf diesem Prinzip beruht die Einrichtung des S. 319 erwähnten Bifluidtachometers [1]) (Fig. 925).

Das Verhalten solcher übereinandergeschichteter Flüssigkeiten unter Einwirkung der Zentrifugalkraft kann man durch den leicht anzufertigenden Schwungmaschinenaufsatz, Fig. 3515, zeigen. *ab*, *cd* sind zwei einerseits zugeschmolzene, etwa fingerweite Glasröhren; sie werden zu $1/3$ mit Quecksilber und zu $1/3$ mit gefärbtem Wasser gefüllt, $1/3$ bleibt leer; das offene Ende verkorkt man gut. Bei *a* und *d* sind sie etwas in die Lappen *m*, *n* eingelassen, und bei *b*, *c* werden sie durch das halbcylindrische auf *oo* geschraubte Holz *e* gehalten; letzteres ist beiderseits so ausgehöhlt, um gerade die verkorkten Enden der Glasröhren aufzunehmen. Dreht man den Apparat schnell, so nehmen die Flüssigkeiten die umgekehrte Ordnung ein, indem das Quecksilber nach *a* und *d* kommt und die Röhren bei *b* und *c* leer bleiben.

Fig. 3515.



Schöner kann man dasselbe Gesetz durch den Apparat Fig. 3516 zeigen; er besteht aus einem bauchigen Glasgefäß (von einer Erdöllampe), welches mit einer hölzernen Fassung versehen ist, um es auf die Schwungmaschine zu schrauben. Man gießt Quecksilber und gefärbtes Wasser hinein, jedoch nicht ganz so viel, als erforderlich ist, um den ausgebauchten Raum auszufüllen, so daß für den mit der Weite der Öffnung gleich weiten cylindrischen Raum des Gefäßes nichts übrig bleibt. Wird das Gefäß schnell gedreht, so bilden die Flüssigkeiten Ringe in dem bauchigen Teile.

Fig. 3516.



612. Zentrifugen. Bei inhomogenen Flüssigkeiten tritt infolge der Wirkung der Zentrifugalkraft bei strömender Bewegung im allgemeinen eine Entmischung ein. Die beigemengten schwereren Teilchen werden aus der Bahn herausgeschleudert und können sich an der Gefäßwandung anhäufen. Leichtere Partikelchen, z. B die Fetteilchen bei Milch, werden umgekehrt nach der inneren Seite der Bahn getrieben. Eine einfache Milchzentrifuge von Muencke zeigt Fig. 3517.

Trockenapparat nach Bertram. In ein cylindrisches Gefäß aus perforiertem Blech wird ein nasser Schwamm eingelegt und dasselbe um seine Achse in Drehung versetzt. Dabei wird das Wasser durch die Poren des Gefäßes herausgeschleudert. (Fig. 3518 E, 13,50.)

[1]) Zu beziehen von der Rheinischen Tachometerbau-Ges. m. b. H., Köln a. Rh.

Schlämmapparat nach Bertram. **Zwei Eimerchen aus Glas** sind beweglich an den Armen eines T-Stückes aufgehängt, welches auf die Schwungmaschine gesteckt wird, und werden mit Wasser, das durch einen Niederschlag getrübt ist, gefüllt. Sie stellen sich beim Drehen horizontal, ohne daß Wasser ausläuft und das Pulver setzt sich an den Bodenflächen ab [1]. (Fig. 3519 Lb, 11.)

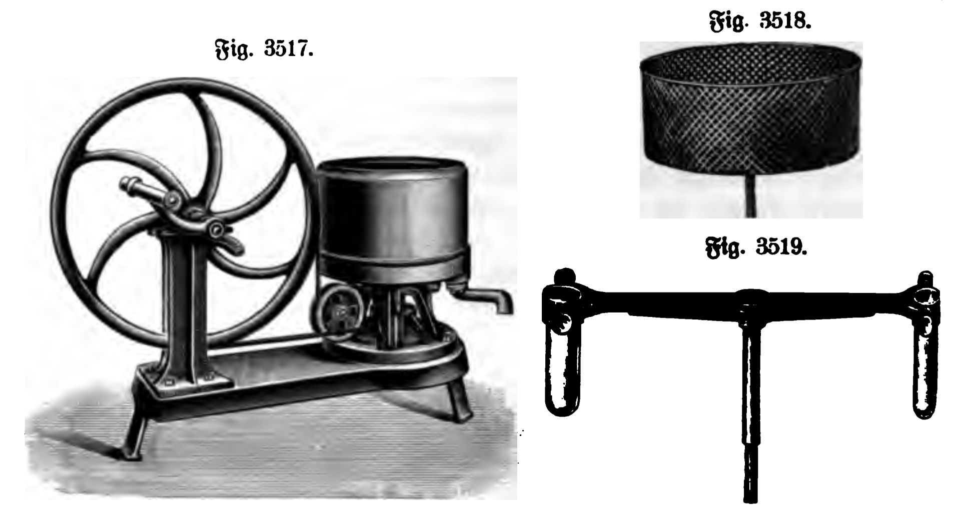
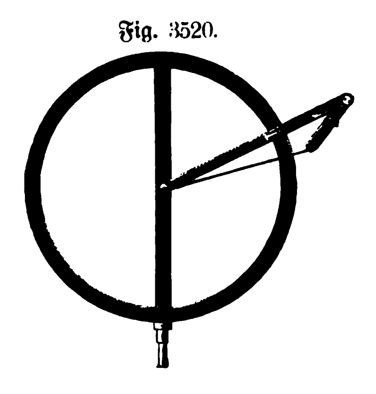


Fig. 3517. Fig. 3518. Fig. 3519.

613. Richtung der Schwerkraft. Die Richtung eines Lotes würde mit der Richtung des Erdradius übereinstimmen, wenn die Drehung der Erde nicht vorhanden wäre. Infolge der Zentrifugalkraft sucht sich aber das Lot in der Richtung senkrecht zur Drehungsachse zu entfernen. Die Schnur wird also von zwei verschieden gerichteten Kräften gespannt und ihre wirkliche Einstellung ergibt sich aus dem Parallelogrammgesetz, wie durch den Apparat Fig. 3520 (E, 30) näher verdeutlicht wird.

Fig. 3520.



Gleiches gilt für die Oberfläche einer Flüssigkeit. Ein Quecksilberspiegel z. B. ist nicht genau horizontal, d. h. senkrecht zur Richtung des Erdradius, sondern bildet einen Teil derjenigen Form (abgeplattete Kugel), welche die Erde annehmen würde, wenn sie ganz aus Quecksilber bestände.

Daß die Schwungkraft die Abplattung der Erde bewirke, zeigt man durch den Schwungmaschinenaufsatz Fig. 3521. Er läßt sich sehr einfach auf folgende Weise herstellen: *aa* ist ein abgedrehtes Stückchen hartes Holz, das auf die Achse der Rolle der Schwungmaschine geschraubt werden kann, *bc* ist ein dünnes viereckiges Eisenstäbchen, welches bei *c* etwas gestaucht ist, und unterhalb in eine gute

---

[1]) Heynemanns Sedimentierungsapparat, d. h. eine kleine durch Wasser getriebene Zentrifuge zur schnellen Abscheidung von Niederschlägen in Reagenzgläsern, liefert C. Desaga in Heidelberg zu 50 Mk. Milchzentrifugen sind zu beziehen von L. Stieger in Frankfurt a. M. (s. a. S. 1242 und Fig. 3229); Gebrüder Heine, Viersen (Rheinpr.) u. a. Eine Laboratoriumszentrifuge nach Fig. 3517 liefert Dr. Rob. Muencke, Berlin NW., Luisenstraße 58, zu 135 bis 420 Mk.

olzschraube endigt; *mmm* ist ein gebogener 1 cm breiter Streifen aus dünnem Iessingblech, welcher in der Mitte und an beiden Enden viereckige, dem Stäbchen *bc* ıtsprechende Löcher hat. Dieser Streifen wird, wie die Figur zeigt, auf das stäbchen gesteckt und die beiden Enden gegen das Holz *aa* festgeklemmt. Dreht ıan schnell, so biegt sich der Streifen zu einem Sphäroid. Zwei Streifen recht-inklig zueinander auf gleiche Weise an das Stäbchen befestigt, zeigen durch ihren rößeren Glanz beim Umdrehen das Sphäroid besser.

Eine plastische Kugel aus Schlämmkreide und Glycerin, in einem Netz an schnüren an der Schwungmaschine aufgehängt, plattet sich bei der Drehung ab.

Plateaus Ölring. (Fig. 3522.) Wie bei den früher beschriebenen Ver-ıchen S. 836 wird ein viereckiger Glastrog mit einer Mischung von Alkohol und Wasser efüllt, welche solches spezifisches Gewicht besitzt, daß ein Tropfen gefärbten Öls arin schwebt. In der Mitte des Troges wird eine vertikale Achse aus Stahldraht ıit Kurbel eingebracht, welche in ihrer Mitte ein kleines Messingscheibchen trägt.

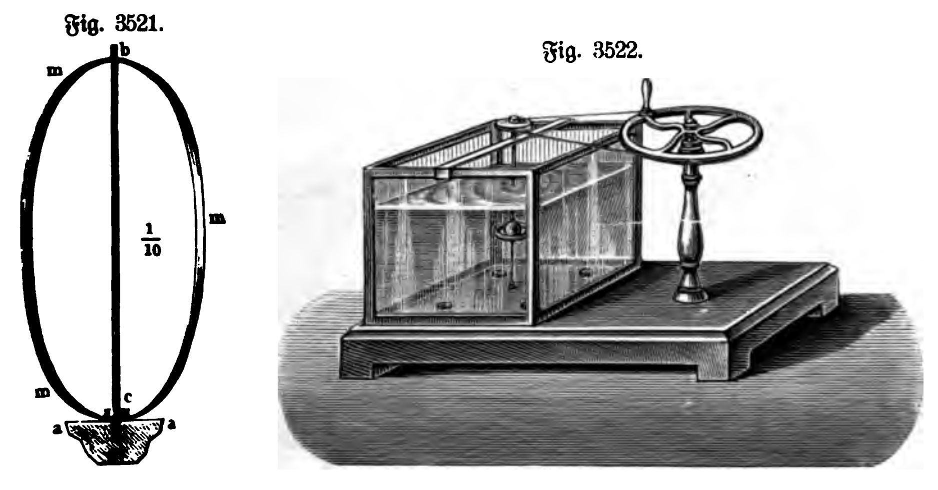


Fig. 3521.

Fig. 3522.

Nit Hilfe einer Pipette bringt man nun eine große Ölkugel derart ein, daß sie ıch an dieses Messingblättchen symmetrisch um die Achse anlegt. Dreht man als-ann die Achse, so plattet sich die Ölkugel zuerst sphäroidisch ab und scheidet schließ-ıch eine oder mehrere kleinere Kugeln oder einen Ring ab, je nachdem die Drehung ıngsam oder rasch und die Ölmasse gleichmäßig oder ungleichmäßig verteilt war [1].)er Versuch läßt sich, falls die Bodenplatte des Troges durchsichtig ist, leicht pro-ızieren. Statt des Schnurlaufs verwendet man dann besser eine dünne biegsame Belle (Spiralfeder) zur Übertragung der Drehung.

614. Ablenkung von Wasserströmen (Meeresströmungen). Ein Fluß, ›elcher in der Richtung von Norden nach Süden fließt, hat vermöge der Trägheit as Bestreben, seine Bewegungsrichtung beizubehalten, so daß infolge der Erd-rehung eine scheinbare Ablenkung (stärkere Korrosion des westlichen Ufers) erfolgt.

Hierin ist ein Beweis der Erdrotation gegeben. Zur Erklärung der analogen lblenkung der Passate benutzt Hartl (Z. **10**, 125, 1897) den in Fig. 3523 dar-estellten Apparat, bei welchem Tintentropfen, die aus dem Gefäß *g* ausfließen,

[1]) Zu haben bei Dr. Houdek u. Hervert, Prag, zu 12 bis 16 fl.

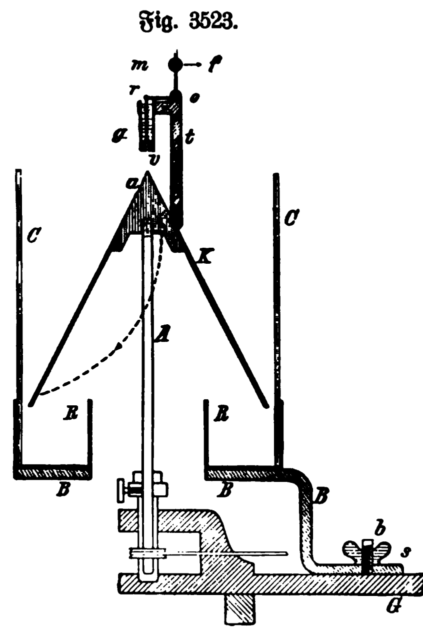
sobald durch die Fliehkraft *f* der Messingkugel *m* das Ventil *v* geöffnet wird, auf die Spitze des Kegels *K* treffen und dann in der punktierten Bahn abwärts gleiten. Der Glascylinder *CC* dient zum Schutz gegen umherspringende Tropfen [1]).

Fig. 3524 zeigt eine Verbesserung, bei welcher der Trichter an einem auf dem Glascylinder *C* aufliegenden Arm befestigt ist (Z. 14, 330, 1901).

Rosenberg konstruierte den in Fig. 3525 (K, 90) dargestellten Universalapparat zur Erklärung der Theorie der Passate und Antipassate, Cyklone und Anticyklone und des Bärschen Gesetzes.

Bei der in der Figur dargestellten Anordnung stellen die schräg von oben kommenden Strahlen die Passatwinde, die von unten schräg nach oben fontänenartig springenden Strahlen die Antipassatwinde dar und zwar unter der Voraussetzung, daß die Erde keine Drehung besitzt.

Fig. 3523.



Wird der Cylinder entgegengesetzt der Richtung des Uhrzeigers gedreht, so weicht jeder Strahl rechts von seiner Ausflußöffnung ab, die von oben kommenden Strahlen nehmen anstatt der Richtung aus

Fig. 3524.



Nord eine solche aus Nordosten an, und die von unten nach oben gehenden Strahlen verlaufen anstatt von Süd nach Nord in abgelenkter Richtung von Südwesten nach Nordosten. Dieser Versuch erklärt die Erscheinungen der Passate und Antipassate der nördlichen Halbkugel. Bei Drehung des Cylinders in entgegengesetzter Richtung — d. h. in gleichem Sinne wie der Uhrzeiger — weichen die Strahlen links von ihrer Richtung ab, was der Erscheinung der Passate und Antipassate der südlichen Halbkugel entspricht.

Ebbe und Flut bilden einen andern Beweis der Erdrotation. Die Wasserhülle der Erde erhält durch die Wirkung des Mondes eine ellipsoidische Form, deren Längsrichtung nach dem Monde gerichtet ist, weil die zugewandte Wassermasse stärker, die abgewandte weniger stark angezogen wird als die Erde. (Fig. 3526 E, 80, siehe Archenhold, Z. 17, 97, 1904.)

Indem sich die Erde in dieser Wasserhülle dreht, scheinen die Wasserberge, sowie die Stellen geringster Wassertiefe auf der Erde zu wandern.

[1]) Zu beziehen von Mechaniker J. Antusch in Reichenberg zu 31 Mk.

Die Reibung bedingt einen nicht unerheblichen Energieverbrauch, der sich in ner allmählichen Verminderung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde äußern

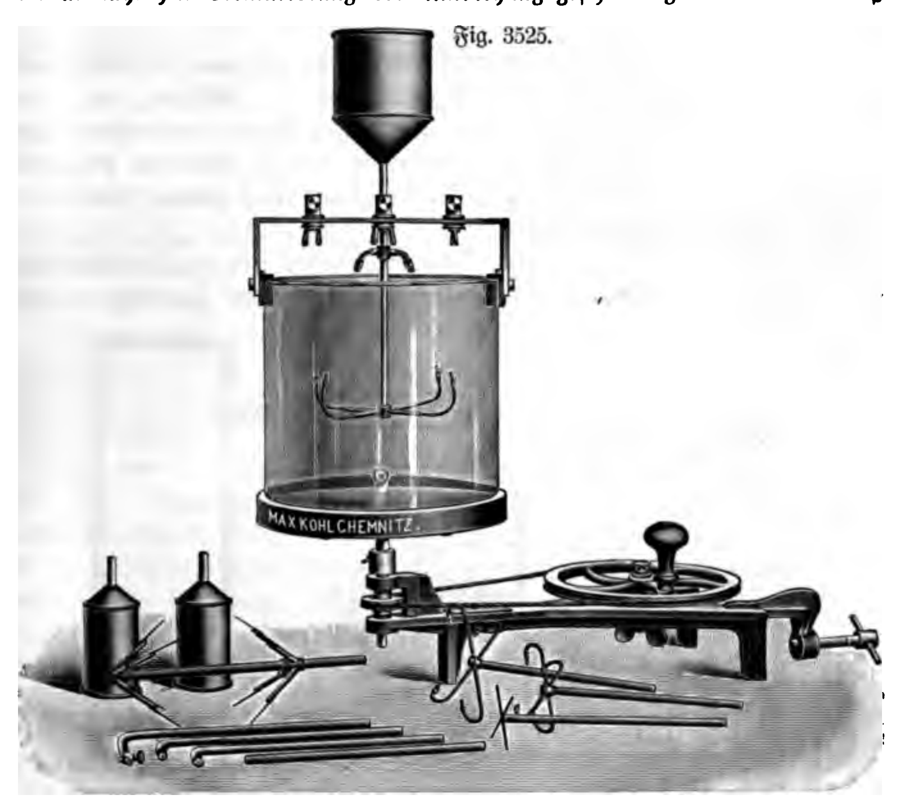
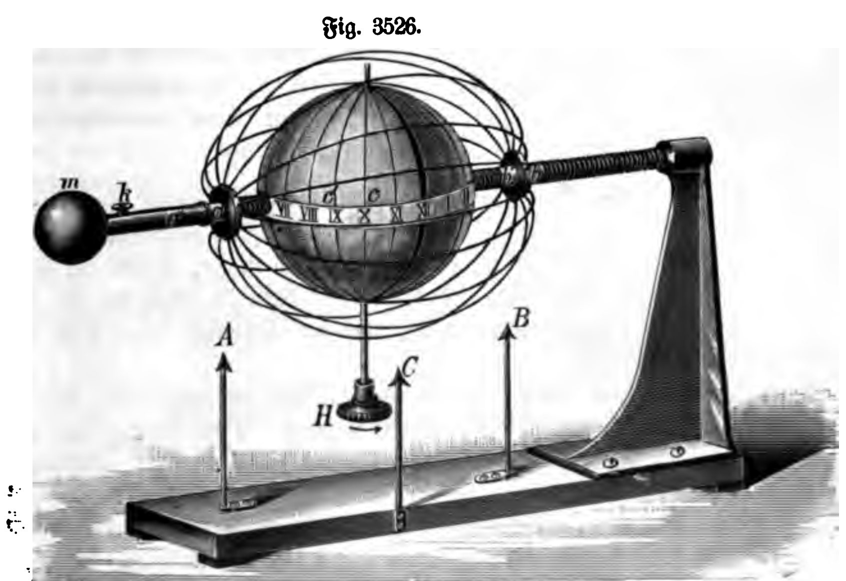


Fig. 3525.

Fig. 3526.



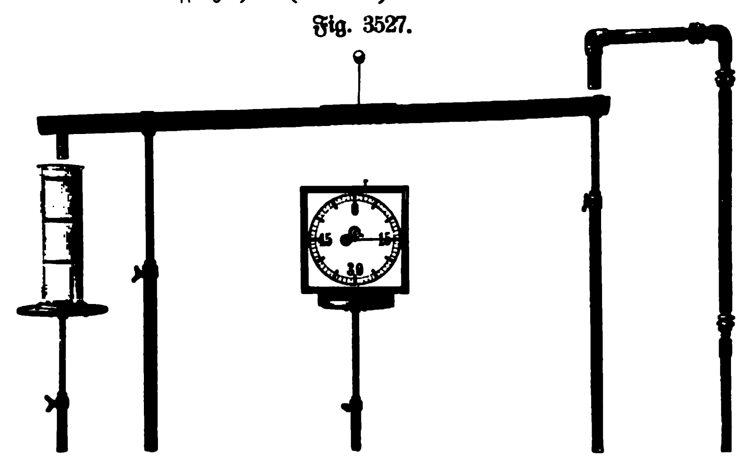
uß. Die Zeiteinheit (Sekunde), welche Konstanz dieser Geschwindigkeit voraus-ßt, ist somit keine absolute, sondern eine veränderliche Einheit.

615. Geschwindigkeitsmessung. Die Bestimmung der Geschwindigkeit und somit der Bewegungsenergie ist bei Flüssigkeiten im allgemeinen weniger einfach als bei festen Körpern.

Direkt kann man die Geschwindigkeit finden z. B. bei dem fließenden Wasser eines Baches, indem man einen leichten Körper, etwa ein Stück Holz, Lykopodium u. dergl. darauf schwimmen läßt und den von diesem Körper pro Sekunde zurückgelegten Weg mißt[1]), indem man die Sekundenuhr auslöst, sobald der Körper eine Marke passiert und sie wieder anhält, sobald er an einer zweiten Marke in bestimmtem Abstand vorbeischwimmt.

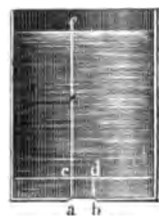
Indirekt kann die Geschwindigkeit bestimmt werden aus der Durchflußmenge, entweder mit einem Wasserzähler (S. 782) oder bei kleineren Quantitäten mittels

Fig. 3527.



eines Maßcylinders oder, falls kein hinreichend großer zur Verfügung steht, mittels eines cylindrischen oder rechteckigen Blechgefäßes, in welchem der Wasserstand beurteilt wird, sei es durch ein angebrachtes Wasserstandsrohr, oder einfacher durch einen Schwimmer mit vertikal darauf befestigtem Maßstab, oder durch einen Schwimmer, verbunden (durch eine über Rollen geführte Schnur) mit einem Index auf Skala.

Fig. 3528.



616. Ausflußgeschwindigkeit. Wenn man in die Seitenwand oder in den Boden eines mit einer Flüssigkeit gefüllten, oben offenen Gefäßes, Fig. 3528, eine Öffnung ab macht, welche im Vergleich mit den Dimensionen des Gefäßes klein ist, so strömt die Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit aus, welche von der Öffnung unter dem Spiegel der Flüssigkeit abhängig ist.

Denken wir uns eine kleine virtuelle Verschiebung vorgenommen, indem wir eine kleine Menge Flüssigkeit austreten lassen, so senkt sich der Spiegel der Flüssigkeit im Gefäße, und ihre potentielle Energie ist um soviel geringer geworden, als wäre die ausgetretene Flüssigkeitsmenge ursprünglich oben gewesen und durch den ganzen Flüssigkeitsstand af heruntergefallen. Ist das Gewicht der Flüssigkeitsmenge $= p$ Kilogramm, die Höhe $af = s$ Meter, so ist demnach die verlorene

[1]) Ich benutze einen 4 m langen Trog, ähnlich wie Fig. 3528, in welchen das Wasser aus der zweizölligen Leitung einfließt. Als Abflußbecken dient der Aufsatz auf die Abflußleitung (S. 26). In 10 Sekunden beträgt der zurückgelegte Weg 2 m.

Energie $= p.s$ Kilogrammeter. Bezeichnen wir die Ausflußgeschwindigkeit mit v, so ist die kinetische Energie, welche die betrachtete ausgeflossene Flüssigkeitsmenge gewonnen hat, $= \frac{m v^2}{2} = \frac{p.v^2}{g.2}$, somit, da sie gleich der verlorenen ist,

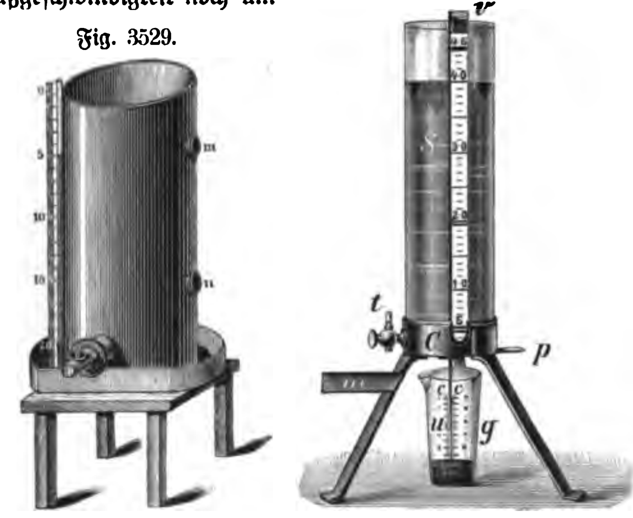
$$p.s = \frac{p.v^2}{2g}$$

oder

$$v = \sqrt{2gs} \text{ m pro Sekunde.}$$

Dies ist aber dieselbe Geschwindigkeit, welche ein Körper erlangt, wenn er eine Höhe s frei durchfällt. Sie ist ebenso wie diese unabhängig von der Natur des Körpers, also gleich groß z. B. für Wasser und Quecksilber.

Da das Gesetz von Torricelli nur gilt, wenn man die Geschwindigkeit der Flüssigkeit im Gefäße gegen jene in der Öffnung vernachlässigen kann, so wird hierzu eine ziemliche Weite des Gefäßes erfordert. Sie vermindert die Ausflußgeschwindigkeit noch um 1 Proz., wenn das Gefäß einen hundertmal größeren Durchmesser hat als die Öffnung. Man wählt zu den Versuchen ein Blechgefäß, welches in Fig. 3529 in ungefähr ein Zehntel der natürlichen Größe abgebildet ist, und versieht es mit einer kommunizierenden Röhre, neben welcher eine Skala sich befindet, die in Centimeter geteilt ist, so daß man stets bequem den Stand des Wassers im Gefäß ablesen kann. Der Ausfluß kann durch vier Öffnungen geschehen, welche alle eine ganze Zahl von Centimetern von derjenigen Höhe abstehen, bis zu welcher das Gefäß gefüllt werden soll, und welche die Skala durch ihr Ende angibt; eine Öffnung befindet sich im Boden[1]).



Beispielsweise ergab sich bei Benutzung der letzteren Öffnung, deren Fläche $= 112$ qmm $= 112.10^{-6}$ qm war, bei 0,6 m Wasserstand eine Ausflußmenge von 14 Litern $= 14.10^{-3}$ cbm in 38 Sekunden. Die Ausflußgeschwindigkeit berechnet sich $= \sqrt{2.9,81.0,6} = 3,6$ m/sec, somit das Quantum pro Sekunde $= 112.10^{-6}.3,6$ und in 38 Sekunden $= 112.10^{-6}.3,6.38 = 15,3.10^{-3}$ cbm $= 15,3$ Liter.

Fig. 3531 zeigt eine ältere, nicht empfehlenswerte Konstruktion der Öffnungen, bei welcher das Wasser durch eine Klappe d an der Röhre a abgesperrt werden kann. Der Ausfluß findet durch die Röhren b und c statt. Die Röhren a und

---

[1]) Fig. 3530 zeigt einen Apparat nach Hartl; zu beziehen von W. J. Rohrbecks Nachf., Wien I, Kärntnerstr. 59.

b sind hierbei zu lang, der Schluß der Klappe *d* ist nicht genügend dicht. Zweckmäßiger ist ein Schieber wie Fig. 3532, welcher noch den weiteren Vorteil hat, daß durch das Öffnen desselben keine unordentliche Bewegung im Wasser entsteht, wie bei der Klappe, infolge deren man ganz ungenaue Resultate erhält.

Um den Wasserstand konstant zu erhalten und nicht fortwährend den Zufluß regulieren zu müssen, bringt man zweckmäßig an dem Gefäß ein Überfallrohr an, aus welchem alles überschüssig zufließende Wasser abläuft.

Fig. 3531.

Fig. 3532.

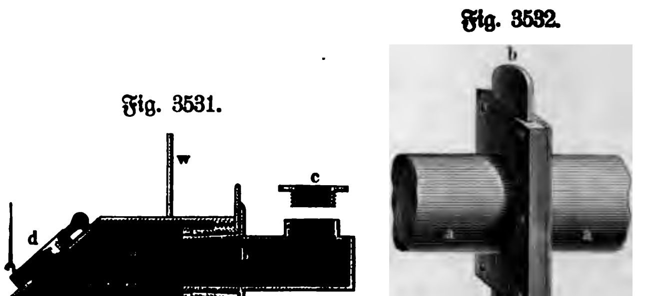


Fig. 3533.

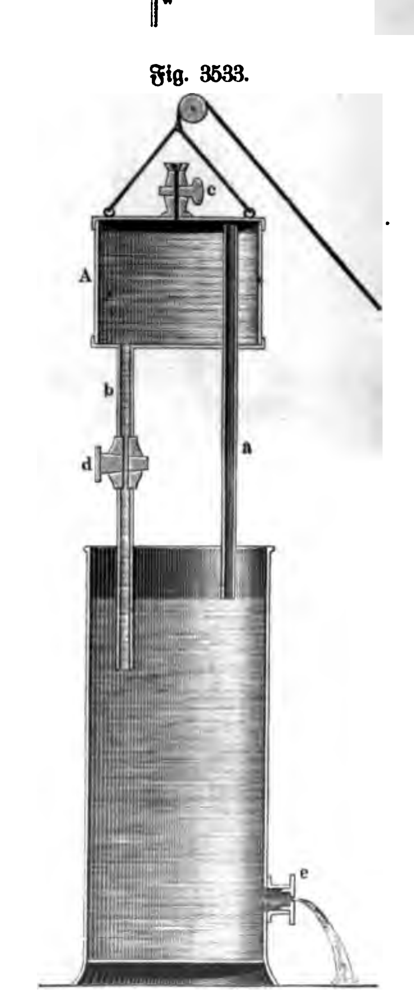
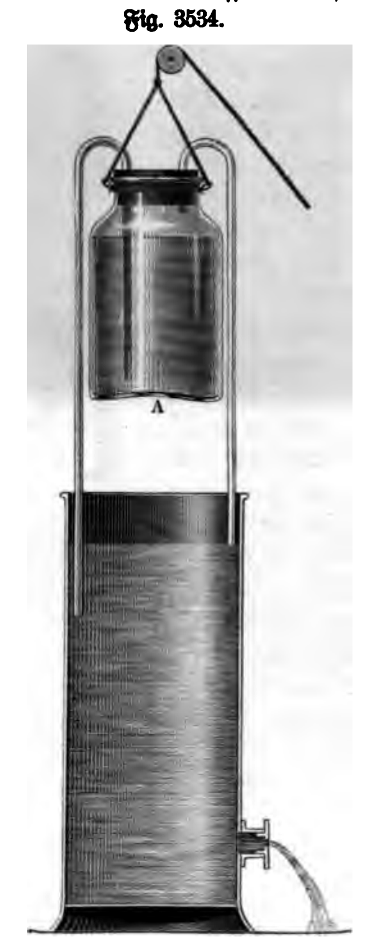


Fig. 3534.



Ein einfaches wassersparendes Mittel zu gleichem Zwecke ist die Mariottesche Flasche (vergl. Fig. 2585, S. 911).

Obwohl bei niederen Druckhöhen die durch das Eintreten der Luftblasen im Wasserstrahle entstehenden Pulsationen sehr merklich werden, so erhält man doch ziemlich genaue Resultate. Um die jedesmalige Druckhöhe zu messen, zeichnet man auf die Flasche selbst mit dem Diamant eine in Centimeter geteilte Skala.

Die Pulsationen lassen sich vermeiden bei Anwendung der Vorrichtung Fig. 3533. Das Gefäß *A* ist luftdicht verlötet und kann durch die Röhre *c* mit Wasser gefüllt werden, während der Hahn *d* geschlossen ist; es wird an einer Schnur, die über eine Rolle läuft, aufgezogen und die Schnur an einem seitwärts befindlichen Nagel so befestigt, daß die Entfernung der Öffnung der Röhre *a* von der Ausflußöffnung *e* die verlangte Druckhöhe gibt. Fig. 3534 zeigt, wie man den gleichen Zweck durch ein Glasgefäß und Glasröhren erreichen kann, nur ist hierbei das Wiederfüllen des Gefäßes *A* unbequem, wenn man nicht eine dritte durch ein Stück Kautschukrohr unterbrochene und hier durch einen Quetschhahn verschließbare Glasröhre mit Trichter anbringt.

Fig. 3535.



Eine wesentlich kompliziertere Vorrichtung hat Escriche, Fig. 3535 (Lb, 120), angegeben.

Das Gefäß *T* steht in Verbindung mit dem Gefäß *D*, dessen Niveau konstant erhalten werden soll, und zwar durch einen Heber, der durch ein Saugrohr mit Hahn oder einen Gummiballon angesaugt wird. Fließt Wasser aus *T* nach *D*, so wird *T* leichter und wird durch den Auftrieb in *V* in die Höhe getrieben, wodurch *T* und somit das Niveau in *T* und in *D* wieder entsprechend steigt. Um den Apparat zu füllen, entfernt man den Heber und den Schwimmer *T*, gießt so viel Wasser in *V*, bis dasselbe beim Hahn *B* ausfließt und schließt dann den Hahn *B*. Dann bringt man Schwimmer und Heber wieder an ihre Stelle und saugt letzteren an, nachdem man auch *D* mit Wasser gefüllt hat. Sollten sich die Wasserspiegel nicht sofort genau gleich einstellen, so kann dies durch Öffnen des Hahnes *C* erreicht werden, wodurch das Niveau in *D* langsam sinkt, oder man öffnet den unter dem Lote sich befindenden Hahn, wodurch Wasser aus *V* nach *D* fließt und das Niveau in *D* etwas steigt. Um den Apparat zu entleeren, öffnet man den Hahn *C*.

Bei den Versuchen selbst mißt man die Zeit durch eine Sekundenuhr (Fig. 2036, S. 650) oder ein Sekundenpendel mit lautem Schlage. Man muß aber hier wie in ähnlichen Fällen mit 0 zu zählen anfangen und nicht, wie es so leicht geschieht, mit 1.

Die ausgeflossenen Mengen bestimmt man am einfachsten mit einem Maßcylinder. (Berechnung der Zeit des Leerens.)

617. **Wasseruhr.** Bezüglich der Zeitmessung durch eine Wasseruhr sei verwiesen auf S. 782. Man kann hier z. B. hinweisen auf die Verwendung der Kübelkette in Verbindung mit einem Räderwerk als Wasseruhr, die Gestaltung einer trichterförmigen Wasseruhr, bei welcher trotz des sinkenden Wasserstandes, also abnehmender Ausflußgeschwindigkeit, die Teilstriche gleichen Abstand haben, die Konstruktion der Walgeruhr[1]) (vergl. S. 1295) und anderes. Das Prinzip der Walgeruhr erinnert an das eines bekannten Spielzeugs, des chinesischen Purzelmanns. Man kauft denselben bei dem Spielwarenhändler. Ist die Stiege aufgesetzt, so krümmt man die Figur zusammen, als wollte man sie mit dem Rücken nach unten gekehrt zugleich auf Hände und Füße stellen, stellt sie aber nur auf die Hände, so daß diese auf der Seite gegen die Treppe sich befinden, worauf die Figur über die Stiege heruntersteigen wird. Geht es nicht, so nehme man die Figur um keinen Preis, denn die zu ihrer Instandsetzung erforderliche Zeit ist meistens viel zu groß, und sehr oft führt es zu Änderungen im Quecksilbergehalt, also zur Öffnung der Figur. Viel sicherer gehen die doppelten Treppenläufer; sie sind aber teurer und am Ende weniger unterhaltend. (W, 3 bis 4.) Es ist dieser Apparat allerdings nur Spielzeug, doch hat schon oft ein derartiges Spielzeug Anlaß zu wichtigen Entdeckungen oder Erfindungen gegeben[2]) (vergl. Fig. 3319, S. 1294).

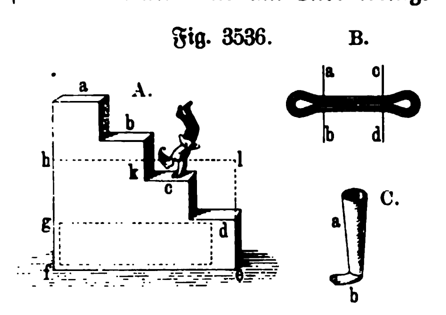


Fig. 3536.

Emsmann[3]) beschreibt die Selbstherstellung in folgender Weise: „Wollen wir selbst eine solche Puppe (Fig. 3536 A) herstellen, so kleben wir aus Papier eine an beiden Enden sich etwas erweiternde Röhre (Fig. 3536 B) zurecht und füllen dieselbe mit Quecksilber so weit, daß die eine Erweiterung etwa zur Hälfte angefüllt ist. Wo die Erweiterungen an der Röhre beginnen, binden und kleben wir je einen beiderseits hervorragenden Draht *ab* und *cd* winkelrecht zur Röhre und untereinander gleichlaufend fest und stecken an diese aus Papier gefertigte Röhren (*a* Fig. 3536 C), welche an dem einen dünneren Ende kleine, die Hände und Füße vorstellende Holz- oder Papp-Platten (*b* Fig. 3536 C) erhalten. Die beiden Drähte *ab* und *cd* sind überdies auf verschiedenen Seiten der Röhre zu befestigen, so daß *cd* unten sich befindet, wenn *ab* oben angemacht ist. Jetzt machen wir einen Versuch, der uns gleichzeitig über die Längenverhältnisse der Röhre und der Arme und Beine den nötigen Anhalt gibt. Gesetzt, an *ab* seien die Arme angesteckt. Wir setzen die Handflächen (*b* der Fig. 3536 C) auf eine Stufe der Treppe und die Fußflächen der an *cd* angesteckten Beine auf die nächst niedere Stufe. Unser Apparat muß sich dann überschlagen, die Arme müssen sich heben, während die Füße stehen bleiben, und die Hände müssen sich auf die zweitfolgende Stufe niederlassen. Wir werden hierbei bald sehen, ob wir der Röhre und den Armen und Beinen die richtige Länge gegeben haben. Sollte es uns nicht gleich gelungen sein, so verfertigen wir eine neue Röhre oder neue Arme und Beine. Das gelungene

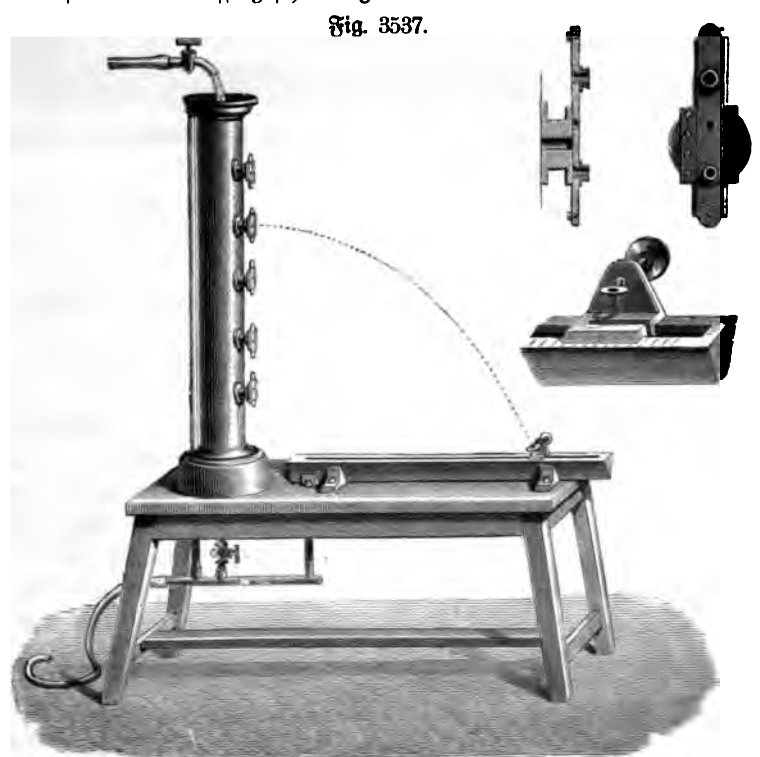
[1]) Siehe das Buch der Erfindungen, Gewerbe u. Industrie 6, S. 587, 1900. — [2]) Über eine abgeänderte Form des Quecksilbermännchens, welche als Spielzeug in den Handel gebracht wird, siehe Prakt. Physik 5, 147, 1892. — [3]) Emsmann und Dammer, Des deutschen Knaben Experimentierbuch, 2. Aufl., Bielefeld 1876, Velhagen u. Klasing, S. 164.

Modell kleiden wir hierauf mit leichtem, angeklebtem Zeuge als Puppe an und versehen sie auch mit einem Kopfe, wozu wir die an den Armen liegende Verdickung der Röhre benutzen.

Die Herstellung ist nicht leicht; aber ist erst eine Puppe für eine bestimmte Treppe gelungen, so können wir schnell noch mehrere anfertigen, wenn wir uns an die einmal erprobten Verhältnisse halten."

618. Wasserzoll. Läßt man konstant ausfließendes Wasser in ein Gefäß einlaufen, welches unten eine Öffnung hat, die genügend eng ist, um eine Stauung des Wassers zu bewirken, so wird die sich einstellende Stauhöhe dem Ausflußgesetz entsprechen müssen; man kann also, falls das Gefäß mit einem Wasserstandszeiger versehen ist, die Skala desselben so eichen, daß direkt die Durchflußgeschwindigkeit des Wassers abgelesen werden kann. Nach ähnlichem Prinzip wird häufig im großen bei einem Kanal oder irgend einem Gerinne unter Benutzung der Stauhöhe und der Öffnung am Schützen, oder der Höhe des Wasserspiegels über der Kante eines Überfalls die Wassergeschwindigkeit ermittelt.

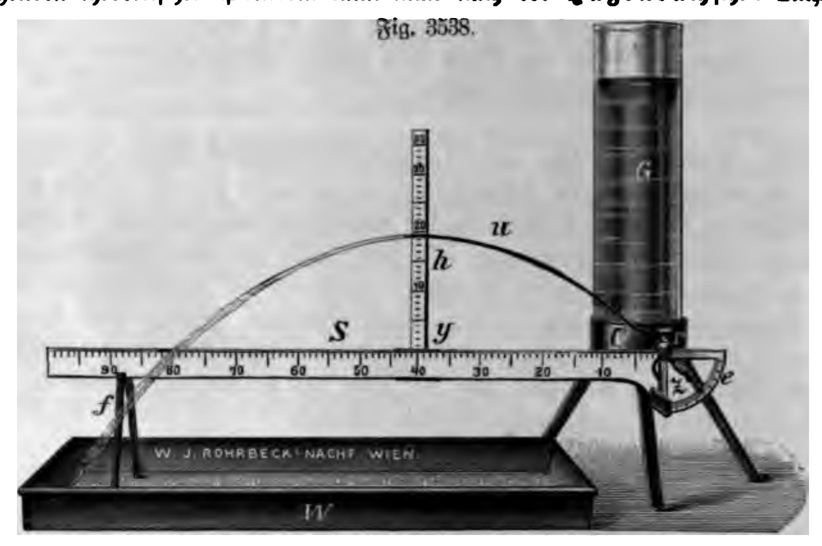
Fig. 3537.



619. Wurfweite. Um die Wurfweite zu bestimmen, wählt man am einfachsten den horizontalen Wurf. Man rechnet dann aus der Höhe der Öffnung über dem Boden die zum Fallen erforderliche Zeit und aus der bereits berechneten theoretischen Ausflußgeschwindigkeit die Wurfweite für diese Zeit, trägt diese auf dem Boden ab, und der Wasserstrahl wird immer ziemlich genau an der bezeichneten Stelle eintreffen, während man bei senkrechtem Sprunge meist nur etwa 95 Proz. der Druckhöhe erhält. (Fig. 3537.)

Bei schief aufsteigenden Wasserstrahlen kann man leicht zeigen, daß dasselbe Ziel durch flachen und durch Bogenwurf erreicht werden kann. Die entsprechenden theoretischen Parabeln kann man nach der Hagenbachschen Methode

Fig. 3538.



darstellen und deren Übereinstimmung mit der Form der Flüssigkeitsstrahlen nachweisen [1]). (Fig. 3539 Lb, 42.)

Fig. 3359.



Ich verwende diesen Apparat in größerer Ausführung derart, daß sich vor der Ausströmungsöffnung eine Erweiterung mit einer Wasserstandsröhre befindet, an welcher der Druck des Wassers abgelesen werden kann, so daß (allerdings mit Rücksicht auf den Bewegungszustand des Wassers in der Erweiterung nur annähernd) die Geschwindigkeit des Strahles sich auch durch die Ausflußformel ermitteln läßt.

Beispielsweise war die Wurfweite = 1,42 m und die Wurfhöhe = 1,3 m. Da $s = \frac{gt^2}{2}$ oder $t = \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{\frac{2.1,3}{9,81}} = 0,51$ Sek., muß $0,51 \,.\, v = 1,42$ m sein, somit die Ausflußgeschwindigkeit $v = 2,8$ m/sec. Die Öffnung hatte $117 \,.\, 10^{-6}$ qm Querschnitt, und in 50 Sekunden flossen 15 Liter aus. Hiernach war tatsächlich $v = \frac{15 \,.\, 10^{-6}}{50 \,.\, 117} = 2,8$ m/sec.

[1]) Zur Demonstration der Wurfparabel sind auch feine Quecksilberstrahlen geeignet, welche man vor einem weißen Schirm vorbeifließen läßt. Eventuell kann Projektion benutzt werden (W, 50.) Einen Apparat zur Demonstration der Wurfparabel bei Flüssigkeiten nach Hartl, Fig. 3538, liefern W. J. Rohrbecks Nachf., Wien I, Kärntnerstr. 59, zu 165 Kronen.

Man kann hier ferner hinweisen auf die Bedeutung von Flach- und Steilwurf beim Feuerlöschen; auf den Ausfluß aus bewegtem Gefäß, artesische Brunnen u. s. w.

620. Hydrometrische Röhre nach Pitot. Erzeugt man in einer U-förmigen Röhre eine Niveaudifferenz und läßt das Wasser zurücksinken, so stellt sich infolge der Trägheit des Wassers eine entgegengesetzte annähernd gleiche Niveaudifferenz her, das Wasser steigt vermöge seiner Geschwindigkeit, die es beim Fall erlangt hat, auf die gleiche Höhe empor, aus welcher es herabgekommen ist. Es pendelt wie ein gewöhnliches Pendel, doch werden durch die Reibung die Schwingungen verhältnismäßig rasch gedämpft, d. h. die jeweils erreichte Höhe entspricht nicht genau der Geschwindigkeit.

Auch ein vertikal geworfener freier Strahl erreicht infolge der Reibungswiderstände nicht die Höhe des Wasserspiegels im Gefäße, wie dies leicht an einem kleinen Springbrunnen etwa unter Anwendung einer Mariotteschen Flasche (Fig. 3540) erkannt werden kann.

Hält man in einen Wasserstrom eine unten umgebogene beiderseits offene Röhre, so daß das Wasser in die Öffnung der Biegung eintritt, so steigt es in der Röhre bis zur Höhe des Wasserspiegels, welcher nach dem Ausflußgesetze der vorhandenen Geschwindigkeit entspricht. Man kann somit die Röhre für eine bestimmte Stellung, z. B. vertikale Stellung, mit einer Skala versehen, an welcher durch die Einstellung der Wassersäule ohne weiteres die Geschwindigkeit des strömenden Wassers abgelesen werden kann [1]).



Fig. 3541.

Fig. 3540.

621. Unabhängigkeit vom spezifischen Gewicht. L. Weber (1879) demonstriert die Tatsache, daß die Ausflußgeschwindigkeit bei gleichem Flüssigkeitsstand unabhängig ist vom spezifischen Gewicht der Flüssigkeit, in sehr einfacher Weise mittels einer Glasröhre von 15 mm Durchmesser, welche am unteren Ende bis auf eine kleine Öffnung zugeschmolzen ist. Dieselbe wird vertikal aufgestellt und man bringt Marken in den Abständen 1, 4, 9, 16, 25 u. s. w. von der Öffnung an. Füllt man die Röhre erst mit Quecksilber und dann mit Wasser und bestimmt die Zeit, welche

[1]) Hydrometrische Röhren liefern G. Falter u. Sohn, München, Kreuzstr. 33. Fig. 3541 K, 105, zeigt eine solche nach Darcy. Zwei Röhren sind nebeneinander angebracht. Die eine ist horizontal umgebogen, um den Stoß des fließenden Wassers aufzunehmen, die andere mit vertikaler Öffnung zeigt den hydrostatischen Druck des Wassers an. An ihrem oberen Ende sind die beiden Röhren mit einem Saugrohr verbunden, das durch einen Hahn abgeschlossen werden kann. Durch diese Einrichtung ist man imstande, die Wassersäule nach Bedarf für die bequeme Ablesung emporzuheben oder zu senken. Durch zwei Schnüre läßt sich der untere Hahn, der die Wassersäulen der Röhren absperrt, schließen und öffnen.

nötig ist zum Durchlaufen des Abstandes zwischen zwei Marken, so findet sich, daß die Ausflußgeschwindigkeit unabhängig ist vom spezifischen Gewicht der Flüssigkeit. Auf gleiche Weise findet sich, daß sich die Ausflußmengen verhalten wie die Quadratwurzeln aus den Flüssigkeitshöhen.

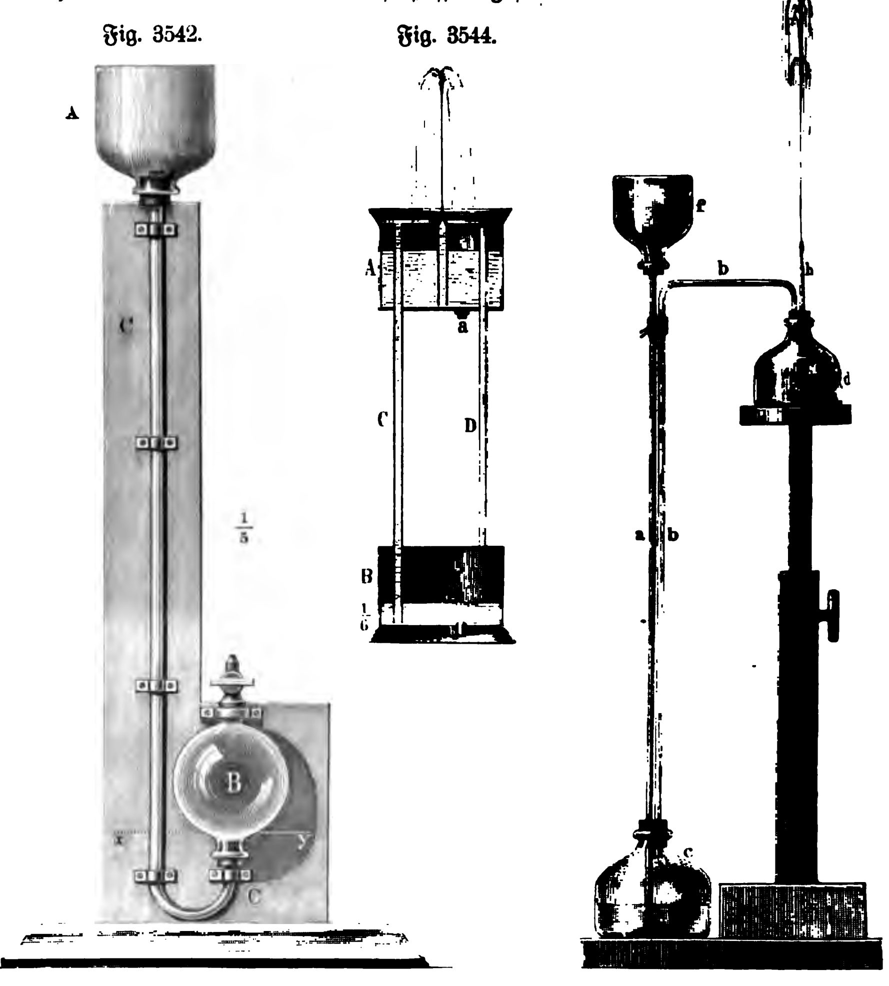
Der Satz der Unabhängigkeit gilt natürlich nicht mehr, wenn die Flüssigkeit keine einheitliche ist, sondern zwei verschiedenartige Flüssigkeiten, z. B. Quecksilber und Wasser, übereinander geschichtet sind.

Daß sich in solchem Fall die Ausflußgeschwindigkeit nach dem Drucke, der an der Ausflußöffnung statt-

Fig. 3543.

Fig. 3542.

Fig. 3544.



findet, richtet, zeigt der in Fig. 3542 abgebildete Apparat. Die beiden Gefäße *A* und *B* sind durch die starke und 3 bis 6 mm weite Glasröhre *CC* verbunden. *B* hat überdies eine zweite Öffnung, auf welche eine Hülse aufgekittet ist, in welche eine Springröhre mit Hahn geschraubt wird. Man füllt den Bogen der Glasröhre bis *xy* mit Quecksilber, dann das Gefäß *B*, nachdem die Springröhre abgeschraubt ist, mit Wasser und zuletzt die Röhre *A* wieder mit Quecksilber; wird nun der Hahn der Springröhre geöffnet, so erhält man einen Wasserstrahl, der jener Wassersäule entspricht, welche der Quecksilbersäule Gleichgewicht halten würde.

Rebenstorff (Z. 12, 286, 1899) benutzt einfach eine U-förmige fingerdicke Glasröhre, welche an einem Schenkel zur Spitze ausgezogen ist und gießt so viel Quecksilber ein, daß das Wasser bis zur Zimmerdecke spritzt.

Eine ähnliche parador wirkende Vorrichtung ist der Heronsbrunnen.

622. Der Heronsbrunnen. Am einfachsten läßt sich derselbe aus etwas starken Glasröhren, wie Fig. 3543, zusammensetzen. Man zieht hierfür die Glasröhren an der Lampe etwas konisch, um sie fester in die wohl ausgesuchten und sorgfältig gebohrten Korke einstecken zu können; man kann hierbei auch den Trichter *f* aus einer Glasröhre und einem Gefäße zusammensetzen, dessen Boden abgesprengt wurde. Aus Blech läßt sich ein Heronsbrunnen sehr einfach nach Fig. 3544 anfertigen. Die beiden Gefäße *A* und *B*

Fig. 3545.

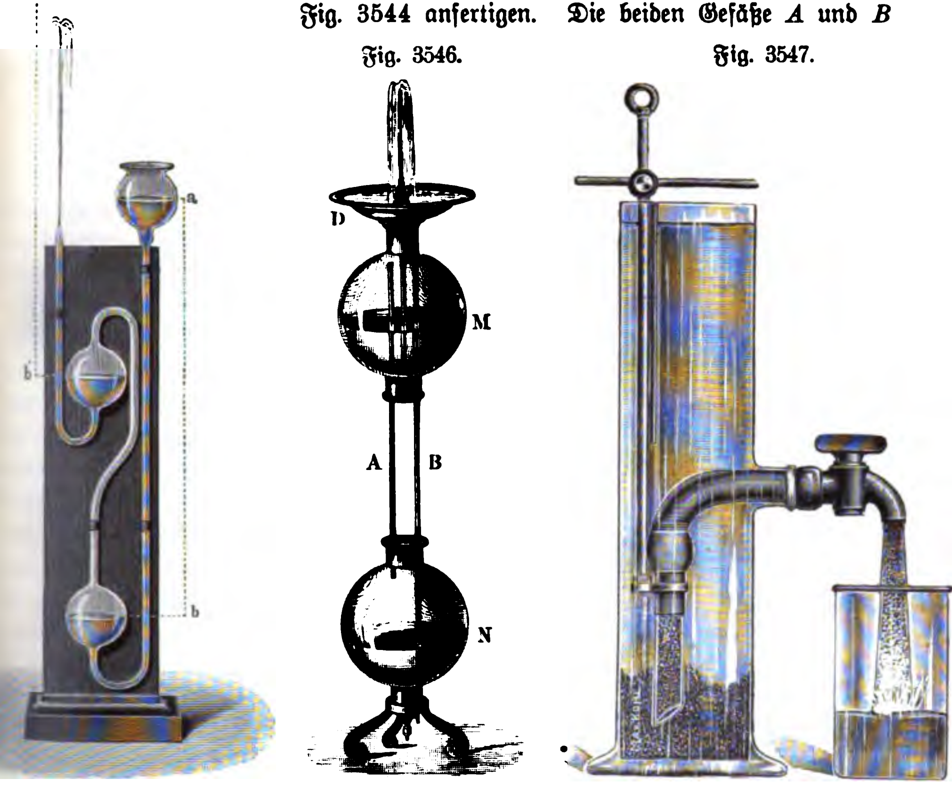


Fig. 3546. Fig. 3547.

haben jedes unterhalb eine mit Kork verschließbare Öffnung *a*, *b*; *A* wird durch diese mit Wasser gefüllt, *B* dadurch nach dem Versuche entleert. Außer den beiden erforderlichen Röhren *C* und *D* kann man die zwei Gefäße zu besserer Festigkeit durch noch zwei den Röhren ähnliche Säulen verbinden, die jedoch in keiner Verbindung mit den Gefäßen stehen. Man hat bei dieser Form den Vorteil, daß das ausgespritzte Wasser sich wieder in dem Becken des oberen Gefäßes sammelt und den Druck im unteren ausübt.

Eine sehr hübsche Form des Heronsbrunnen ist die, bei der beide Gefäße aus Glaskugeln bestehen und durch die beiden (Glas-)Röhren, wie bei Fig. 3544 (Lb, 35), verbunden sind, so daß alles durchsichtig ist. Andere Formen zeigen Fig. 3545 (L, 5) und Fig. 3546 (E, 50).

623. Hydrostatischer Extraktor nach Bazin, Fig. 3547 (K, 60). Durch geeignete Gestaltung der Ausflußröhre kann auch bewirkt werden, daß tiefer liegende, etwa einen schlammigen Niederschlag enthaltende Schichten an höherer Stelle zum Ausfluß kommen wie beim Heber.

624. Zentrifugalkraft bei bewegten Flüssigkeiten. Große Störungen der Ausflußerscheinungen können durch die Zentrifugalkraft hervorgebracht werden. Selbst aus einem offenen Trinkglase fließt das Wasser nicht heraus, wenn sich die Öffnung unten befindet, falls man es, wie Fig. 3548 andeutet, an Schnüren angebunden (an einer Schleuder) im Kreise herumschwenkt. Eine andere Vorrichtung zu gleichem Zwecke zeigt Fig. 3549 (Lb, 3).

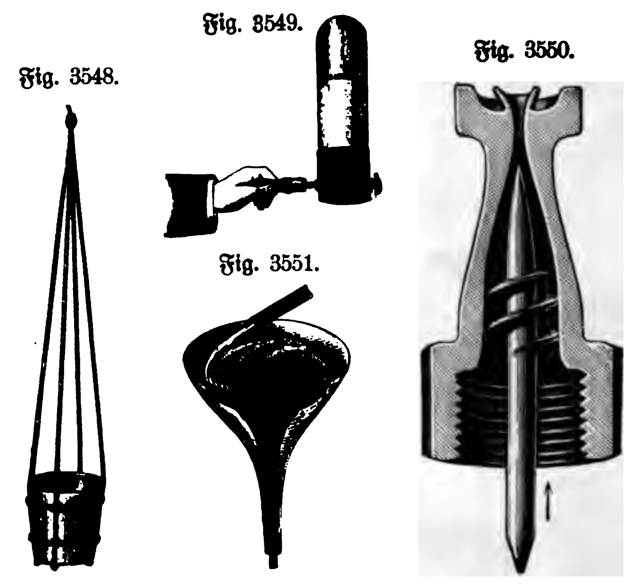


Fig. 3548. Fig. 3549. Fig. 3550. Fig. 3551.

Wird ausströmendem Wasser, bevor es aus der Mündung austritt, eine rotierende Bewegung erteilt, so löst sich der Strahl in viele kleine Tropfen auf, welche sich in Form eines Kegels zerstreuen. Hierauf beruht Körtings Streudüse, Fig. 3550[1]).

625. Wirbel. Läßt man, wie Fig. 3551 andeutet, in einen großen Glastrichter in tangentialer Richtung Wasser einfließen, so bildet sich ein Wirbel und die Oberfläche senkt sich bis zur Ausflußöffnung herunter, so daß trotz der großen Druckhöhe nur wenig Wasser auszufließen vermag, auch dann, wenn der Zufluß abgestellt wird, da die Rotation noch lange fortdauert.

626. Kontraktion des Strahles. Ein Hauptgrund, weshalb die Ausflußversuche keine genauen Resultate geben, beruht darin, daß die Flüssigkeitsteilchen von allen Seiten her gegen die Ausflußöffnung hinströmen, vermöge der Trägheit ihre Bewegungsrichtung beizubehalten suchen und so eine Kontraktion des austretenden Strahles veranlassen, welche die Ausflußmenge in der Art beeinflußt, als ob die Ausflußöffnung kleiner wäre, als sie tatsächlich ist. Es tritt die sog. Contractio venae ein (Fig. 3552). Bei *cd* beträgt der Querschnitt des Wasserstrahles ungefähr noch $^2/_3$ vom Flächeninhalte der Öffnung. Ebenso beträgt die wirkliche Ausflußmenge ungefähr $^2/_3$ der theoretischen.

Bezeichnen wir mit Q die wirkliche Ausflußmenge, so ist demnach

$$Q = {}^2/_3\, M = {}^2/_3\, F \sqrt{2gs}$$

oder genauer

$$Q = 0{,}64\, F \sqrt{2gs}.$$

[1]) Zu beziehen von Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover zu 12 bis 300 Mk.

'lters kann man diese Formänderungen des Strahls in großer
'en, vorausgesetzt, daß das Wasser in dem Behälter möglichst

etwas feinen Heber ausfließende Wasser oder Quecksilber
Vielleicht ließe sich dieser Versuch auch für Projektion

..r **Adhäsion beim Ausfluß von Flüssigkeiten.** Das „An-
..ett an dem Gefäße verhindert man am wirksamsten, wenn man
..lasstab mit der Flüssigkeit benetzt und ihn dann in vertikaler Rich-
... jenen Teil des Randes vom Gefäße hält, über welchem man ausgießen
..; die Flüssigkeit folgt dem Stabe.

Stellt man einen sehr flachen Trog mit Quecksilber etwas geneigt so auf, daß das Quecksilber an einer Seite eben herausfließt, so nimmt infolge der Oberflächenspannung das erst überfließende schließlich die übrige Menge mit sich.

630. Einfluß der Reibung. Die Verminderung der Ausflußmenge bei Anwendung eines langen Schlauches, dessen offenes Ende sich in gleicher Höhe befindet wie die früher benutzte Ausströmungsöffnung, ist sehr auffällig. Man kann aus dem Verhältnis der Ausflußmengen den Druckhöhenverlust ableiten.

Wäre beispielsweise ohne Schlauch die Ausflußmenge in 40 Sekunden 15 Liter, mit Schlauch 5 Liter, so folgt, daß die Ausströmungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{1}{3}\sqrt{2gs} = \sqrt{2g\cdot\frac{s}{9}},$$

d. h. sie ist dieselbe als ob die Druckhöhe nicht s, sondern $s/9$ wäre, oder wenn $^8/_9$ der ganzen Druckhöhe verloren wären.

Ferner zeigt sich sehr auffallend der Einfluß der Reibung an der Abhängigkeit der Höhe eines Springbrunnens von der Schlauchlänge. Hier ist der Verlust an Druckhöhe direkt zu sehen.

Daß die der Röhrenwand anliegende Schicht in Ruhe bleibt und die Geschwindigkeit gegen die Achse hin zunimmt, daß also die Flüssigkeitsmasse in dem Rohre in konzentrische Hohlcylinder zerfällt, welche unter Reibung übereinander hingleiten, weist Warburg nach, indem er in das Rohr farbloses und durch einen Tropfen Methylviolettlösung dunkelgefärbtes Glycerin einbringt, welche in scharfer Fläche aneinander grenzen (Fig. 3557). Bringt man nun die Flüssigkeit in der Richtung gegen das helle Glycerin in Strömung, so sieht man das dunkle in zugespitztem Strahl in dieses einschießen. Derselbe Versuch läßt sich mit rotem und gelbem Öl anstellen (Projektion).

Fig. 3557.

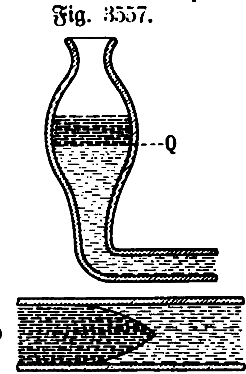


Fig. 3558.



Um zu zeigen, daß das Wasser anfänglich nicht mitgenommen wird, wenn man ein cylindrisches Glas in Rotation versetzt, kann man nach Hartl (Z. 14, 330, 1901) ein beschwertes Reagenzglas auf dem Wasser schwimmen lassen.

Die Ausflußgeschwindigkeit wird durch cylindrische oder konische Ansatzröhren in demselben Verhältnis vermindert, in welchem die Ausflußmenge vermehrt wird.

Den Einfluß der Länge cylindrischer Röhren auf die Ausflußmenge zeigt man ganz einfach durch zwei von demselben Stücke genommene, möglichst gleich weite Glasröhren, die man mittels Kork successive in eine Öffnung des Gefäßes steckt; man nimmt die eine Röhre viermal so lang als die andere. Will man den Einfluß der Weite zeigen, so müssen die beiden gleichlangen Röhren auch gleiche Ausflußöffnungen haben. Ferner könnte man noch auf einen störenden Einfluß von Knie- und Kropfröhren hinweisen.

Fig. 3556.

Wollte man eine Ausflußöffnung haben, um daran die saugende Wirkung des zusammengezogenen Strahles zu zeigen, so müßte die cylindrische Ausflußröhre bis 5 mm weit und nicht über 1 cm lang genommen werden, wie in Fig. 3556. Die engste Stelle des Strahles befindet sich nämlich um den halben Durchmesser der Öffnung von dieser entfernt, und es wäre bei geringerer Weite kaum mehr möglich, an der betreffenden Stelle eine Röhre einzusetzen. Der Druck darf dabei nicht groß sein, weil sich der Strahl bei größerem Druck von der Röhrenwand loslöst und frei herausfließt. Die Länge der Saugröhre darf nicht mehr als 1 dm betragen.

627. **Erweiterungen und Verengungen.** Fließt eine Flüssigkeit durch eine Röhre von variablem Querschnitt, und ist stationärer Zustand eingetreten, d. h. fließt in gleichen Zeiten die gleiche Menge hindurch, so muß wegen der Inkompressibilität der Flüssigkeiten die Stromstärke an jeder Stelle dieselbe, d. h. die Geschwindigkeit dem Querschnitt umgekehrt proportional sein. Tritt die Flüssigkeit aus einem weiten Teil in einen engen über, so geht potentielle Energie, die durch die Druckhöhe an der betreffenden Stelle gemessen wird, in kinetische Energie über, da die Geschwindigkeit wächst. Die Druckhöhe (hydrodynamischer Druck) muß demnach kleiner werden, ja unter Umständen kann negativer Druck, d. h. Saugwirkung auftreten, wie sie sich bei Ausflußröhren nach Fig. 3556 zeigt. Man nennt die nach dem Torricellischen Gesetz der Geschwindigkeit äquivalente Druckhöhe „Geschwindigkeitshöhe“. Die Summe beider muß in Röhren ohne Reibung immer konstant und gleich der ursprünglichen Druckhöhe der Wasserteilchen sein, denn deren Produkt mit der Masse gibt die ursprüngliche potentielle Energie, die sich wohl in kinetische umsetzen, aber nicht verschwinden kann.

628. **Einfluß der Oberflächenspannung.** Bei jedem Wasserstrahl, ebenso gut bei einem senkrecht abwärts fließenden wie bei einem Springbrunnen, beobachtet man eine störende Wirkung der Oberflächenspannung, insofern sich der Strahl in einiger Entfernung von der Ausflußöffnung in Tropfen auflöst.

Schon zuvor beobachtet man eigentümliche Anschwellungen und Einschnürungen, wie dies schon bei Besprechung des Wasserfalls Fig. 3553 bemerkt wurde, welche auf das Vorhandensein eines Schwingungszustandes hinweisen.

Bei Anwendung verschieden gestalteter Ausflußöffnungen (Schlitz, Kreuz, Dreieck u. s. w.) im Boden eines weiten auf einem hohen, soliden Gestell ange-

brachten Blechbehälters kann man diese Formänderungen des Strahls in großer Regelmäßigkeit erhalten, vorausgesetzt, daß das Wasser in dem Behälter möglichst vollkommen in Ruhe ist.

Auch das aus einem etwas feinen Heber ausfließende Wasser oder Quecksilber zeigt dieselben sehr schön. Vielleicht ließe sich dieser Versuch auch für Projektion geeignet machen.

629. Wirkungen der Adhäsion beim Ausfluß von Flüssigkeiten. Das „Anziehen" der Flüssigkeit an dem Gefäße verhindert man am wirksamsten, wenn man zuerst einen Glasstab mit der Flüssigkeit benetzt und ihn dann in vertikaler Richtung an jenen Teil des Randes vom Gefäße hält, über welchem man ausgießen will; die Flüssigkeit folgt dem Stabe.

Stellt man einen sehr flachen Trog mit Quecksilber etwas geneigt so auf, daß das Quecksilber an einer Seite eben herausfließt, so nimmt infolge der Oberflächenspannung das erst überfließende schließlich die übrige Menge mit sich.

630. Einfluß der Reibung. Die Verminderung der Ausflußmenge bei Anwendung eines langen Schlauches, dessen offenes Ende sich in gleicher Höhe befindet wie die früher benutzte Ausströmungsöffnung, ist sehr auffällig. Man kann aus dem Verhältnis der Ausflußmengen den Druckhöhenverlust ableiten.

Wäre beispielsweise ohne Schlauch die Ausflußmenge in 40 Sekunden 15 Liter, mit Schlauch 5 Liter, so folgt, daß die Ausströmungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{1}{3}\sqrt{2gs} = \sqrt{2g\cdot\frac{s}{9}},$$

d. h. sie ist dieselbe als ob die Druckhöhe nicht s, sondern $s/9$ wäre, oder wenn $8/9$ der ganzen Druckhöhe verloren wären.

Ferner zeigt sich sehr auffallend der Einfluß der Reibung an der Abhängigkeit der Höhe eines Springbrunnens von der Schlauchlänge. Hier ist der Verlust an Druckhöhe direkt zu sehen.

Daß die der Röhrenwand anliegende Schicht in Ruhe bleibt und die Geschwindigkeit gegen die Achse hin zunimmt, daß also die Flüssigkeitsmasse in dem Rohre in konzentrische Hohlcylinder zerfällt, welche unter Reibung übereinander hingleiten, weist Warburg nach, indem er in das Rohr farbloses und durch einen Tropfen Methylviolettlösung dunkelgefärbtes Glycerin einbringt, welche in scharfer Fläche aneinander grenzen (Fig. 3557). Bringt man nun die Flüssigkeit in der Richtung gegen das helle Glycerin in Strömung, so sieht man das dunkle in zugespitztem Strahl in dieses einschießen. Derselbe Versuch läßt sich mit rotem und gelbem Öl anstellen (Projektion).

Fig. 3557.

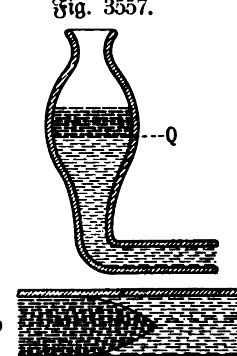


Fig. 3558.



Um zu zeigen, daß das Wasser anfänglich nicht mitgenommen wird, wenn man ein cylindrisches Glas in Rotation versetzt, kann man nach Hartl (Z. 14, 330, 1901) ein beschwertes Reagenzglas auf dem Wasser schwimmen lassen.

Hängt man ein rohes und ein hart gekochtes Ei als Pendel auf und versetzt beide in drehende Schwingungen, so kommt ersteres rasch zur Ruhe. Hält man ein sich drehendes rohes Ei an und läßt es sofort wieder los, so kommt es von selbst wieder in Drehung, ein gekochtes nicht (Leconte 1890)[1].

Zur Messung der Flüssigkeitsreibung kann man den auf S. 748 beschriebenen Apparat (Fig. 2249) benutzen. Da die Reibung proportional der Geschwindigkeit wächst, wird ein an der Schnur ziehendes Gewicht, wenn der Zwischenraum zwischen beiden Cylindern mit einer Flüssigkeit, z. B. Sirup, gefüllt ist, zunächst beschleunigte Drehung hervorbringen, bis der Reibungswiderstand dem Zug des Gewichtes gleich geworden ist. Von da an bleibt die Drehungsgeschwindigkeit dem Trägheitsgesetz zufolge konstant. Verdoppelung der treibenden Kraft wird somit Verdoppelung der Drehungsgeschwindigkeit bewirken müssen. Man kann sich leicht davon überzeugen, daß dies zutrifft. Beispielsweise senkte sich ein Gewicht von 0,04 kg in 30 Sekunden um 0,5 m, während ein Gewicht von 0,20 kg in 15 Sekunden um 1,2 m herabsank. Die Kräfte verhalten sich wie 1 : 5, ebenso die Geschwindigkeiten. Bei 50 g und 100 g sind die Zeiten für dieselbe Senkung 78 bzw. 39 Sekunden.

Ist η der Reibungskoeffizient, v die Geschwindigkeit der Verdrehung, h der Abstand der beiden Cylinder und f ihre Oberfläche, so ist die zur Drehung nötige Kraft

$$k = \eta \cdot f \cdot \frac{v}{h} = \eta . 2\pi r l \cdot \frac{s}{t} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{h} \text{ kg},$$

wenn r der Radius, l die Länge des inneren Cylinders, s der in der Zeit t vom Gewicht zurückgelegte Weg, R der Radius der Rolle, an welcher das Gewicht zieht.

Beispielsweise war $s = 1{,}2$ m, $t = 15$ Sekunden, $r = 0{,}015$ m, $R = 0{,}11$ m, $l = 0{,}33$ m, $h = 0{,}03$ m, $k = 0{,}2$ kg, somit

$$\eta = \frac{k.t.R.h}{2\pi r.l.s.r} = \frac{0{,}2 . 15 . 0{,}11 . 0{,}03}{2 . 3{,}14 . 0{,}015 . 0{,}33 . 1{,}2 . 0{,}015} = 17{,}8 \text{ kg pro Quadratmeter},$$

bei 1 m Abstand und 1 m/sec Geschwindigkeit, d. h. in technischen Einheiten; oder $= 17{,}8 . 981\,000 . 10^{-4} = 1760$ absolute Einheiten.

Für Wasser würde sich nur 0,0001 kg pro Quadratmeter bei 1 m/sec Geschwindigkeitsdifferenz pro 1 m ergeben.

Ferner kann man zur Messung des Reibungskoeffizienten die Dämpfung der Torsionsschwingungen einer horizontalen kreisförmigen Scheibe zwischen ruhenden Scheiben oder diejenige eines Flüssigkeitsbehälters, in welchen ein ruhender Cylinder eintaucht, verwenden[2].

Ich benutze hierzu den S. 1317 besprochenen Torsionsapparat, bestehend aus einem etwa 5 m langen, 3 mm dicken, steifen Messingdraht und einer daran gehängten horizontalen Messingstange von 1 m Länge, an deren Enden sich schwere Bleigewichte befinden. Das logarithmische Dekrement der Schwingungen ist, so lange die Vorrichtung für sich schwingt, sehr klein. Wird sie aber gekuppelt mit dem ebenfalls früher besprochenen Reibungsapparat, bestehend aus zwei konaxialen Cylindern, zwischen welchen sich eine Flüssigkeit befindet (vergl. S. 748), so zeigt sich eine sehr rasche Abnahme der Schwingungen, aus welcher auf die Größe der inneren Reibung ein Schluß gezogen werden kann.

---

[1]) Über experimentelle Erläuterung der Zähigkeit von Flüssigkeiten siehe Gray, Lehrbuch der Physik 1, 377, Fig. 193, Braunschweig 1904. — [2]) Vergl. G. O. Meyer, Wied. Ann. 43, 1, 1891: Mützel, Ebend. S. 15.

Die Reibung wird um so größer, je geringer der Abstand zwischen den beiden Cylindern, und man gelangt so schließlich zu dem Fall einer in Lagerschalen sich drehenden Transmissionswelle, wobei die Reibung im wesentlichen die innere Reibung der zwischen beiden befindlichen Ölschicht ist.

An einer mit Schwungrad versehenen Welle, welche in geölten Lagern läuft (Lager mit selbsttätiger Ringschmierung), kann man den Einfluß der Flüssigkeitsreibung auf die Beschleunigung beim Antrieb durch eine konstante Kraft nachweisen, insofern schließlich die Geschwindigkeit konstant wird. Ohne Schmiermittel müßte sie beständig wachsen (theoretisch), da die Reibung fester Körper unabhängig ist von der Geschwindigkeit.

Tribometer genannte Vorrichtungen dieser Art sind bereits auf S. 765 besprochen [1]).

In manchen Fällen wirkt dabei auch die Oberflächenspannung mit und veranlaßt scheinbare Veränderungen des Reibungswiderstandes, welche in Störungen der Bewegung zum Ausdruck kommen.

Bringt man z. B. auf einen Spiegel einen Tropfen Wasser, legt darauf, die konvexe Seite nach unten, ein Uhrglas, und neigt nun den Spiegel schwach nach verschiedenen Seiten, so gleitet das Uhrglas nicht wie auf trockener Platte sofort nach der tiefst liegenden Seite, sondern gerät in fortwährend wechselnde Rotationen. Befestigt man darauf ein kleines Figürchen, so wird daraus ein unterhaltendes Spielzeug.

Fig. 3559.



Tariert man auf einer Tafelwage ein hohes cylindrisches Blechgefäß und läßt einen Körper hineinfallen, so zeigt sich (infolge der Geringfügigkeit der Luftreibung) ein merklicher Einfluß auf die Wage erst im Momente des Aufstoßens. Anders wenn man das Gefäß mit Wasser füllt. Infolge der Reibung wird das Wasser mit bewegt und übt einen Druck auf die Wage aus. Würde man das Wasser durch eine sehr zähe Flüssigkeit, wie Syrup oder Marineleim, ersetzen, so wäre dieser Druck fast genau gleich dem Gewicht des Körpers. Gleiches gilt für den Fall, daß das spezifische Gewicht des Körpers nur wenig von dem des Wassers abweicht oder daß das Volumen des Körpers sehr klein ist, so daß die Reibung die Gewichtsdifferenz nahezu kompensiert. Suspendiert man deshalb z. B. Lehm, Kreide, feine Niederschläge und dergleichen in Wasser, so ist das spezifische Gewicht dieses Schlammes nahezu dasselbe, wie wenn er eine homogene Masse wäre, obschon die Teilchen in beständigem Sinken begriffen sind.

Ebenso verhalten sich Teilchen, welche leichter als Wasser sind, z. B. von Fett, d. h. sie bewirken eine Verminderung des spezifischen Gewichts (Milch).

631. Durchfluß durch Kapillaren. Das Poiseuillesche Gesetz, daß das in der Zeiteinheit durch eine Kapillare strömende Flüssigkeitsvolum proportional ist der Druckdifferenz an den Enden der Röhre, der vierten Potenz des Querschnittradius und umgekehrt proportional der Länge des Rohres, pflege ich nachzuweisen unter Be-

[1]) Ein Konsistenzmesser nach Weiß zur Untersuchung von Gummi, Zuckerlösungen, Öl u. s. w. (Fig. 3559) ist zu beziehen von Max Kähler u. Martini, Berlin N., Chausseestr. 3, zum Preise von 160 Mk.

nutzung eines starkwandigen, eisernen Gefäßes, an welches sich verschiedene, etwa 1/2 m lange Kapillaren ansetzen lassen. Durch diese wird die Flüssigkeit hindurchgedrückt in der Weise, daß man das Gefäß an die Druckluftleitung anschließt (Fig. 3560).

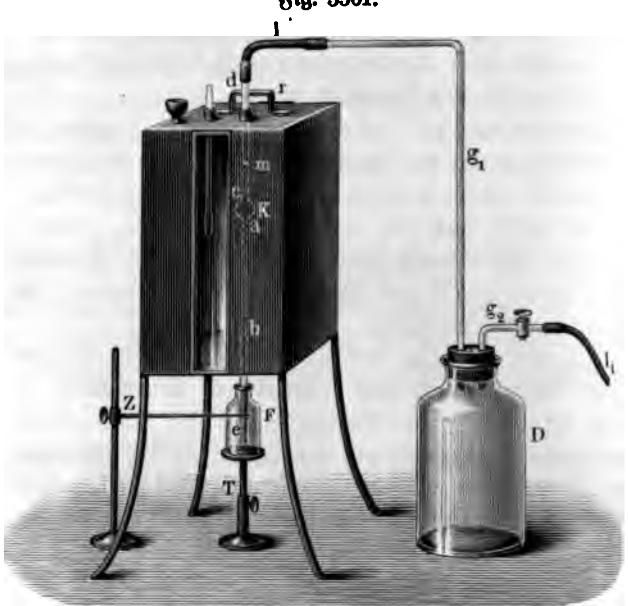
Fig. 3560.

Ist V die in t Sekunden ausfließende Flüssigkeitsmenge in Cubikmetern, p die Druckdifferenz an den Enden der Kapillare in Kilogrammen pro Quadratmeter, l Länge und R Halbmesser der Kapillare in Metern, η der Reibungskoeffizient in technischen Einheiten, so ist:

$$V = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p}{l} \cdot \frac{R^4}{\eta} \cdot t \text{ cbm}.$$

Für Wasser ist nach obigem bei 15° $\eta = 0{,}000116$.

Fig. 3561.



Beispielsweise müßte bei dem Druck von 2 kg pro Quadratcentimeter = 20000 kg pro Quadratmeter bei $R = 0{,}0006$ m, $t = 97$ Sekunden, $l = 0{,}78$ m sein:

$$V = \frac{3{,}14 \,.\, 20\,000 \,.\, 6^4 \,.\, 10^{-16} \,.\, 97}{8 \,.\, 0{,}78 \,.\, 0{,}000\,116} = 0{,}001 \text{ cbm}.$$

In der Tat betrug die ausgeflossene Menge 1 Liter.

Umgekehrt ergibt sich aus der Formel

$$\eta = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p}{l} \cdot \frac{R^4}{V} \cdot \text{kg pro Quadratmeter}$$

bei 1 m/sec Geschwindigkeitsdifferenz pro 1 m. Bedeutet p die Druckdifferenz in Dynen pro Quadratcentimeter und sind l und R in Centimetern angegeben, V in Cubikcentimetern gemessen, so gibt die Formel den Reibungskoeffizienten η in absoluten Einheiten. Der gewöhnlich angegebene Reibungskoeffizient in Gramm pro Quadratcentimeter ist der 981. Teil dieses absoluten Koeffizienten.

Die Reibung ändert sich beträchtlich mit der Temperatur. Beispielsweise ist für Wasser, bei

	0°	15°	20°	25°	30°
η =	0,017 97	0,011 40	0,010 04	0,008 95	0,008 03

in absoluten Einheiten.

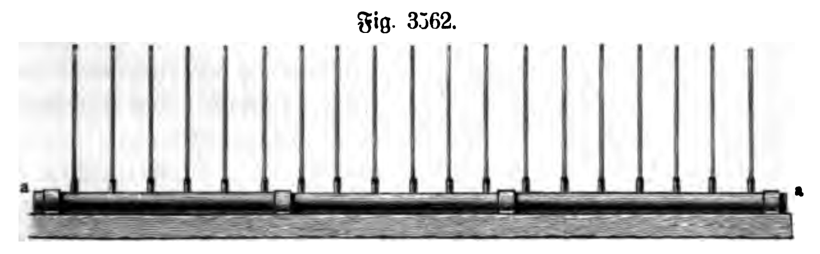
Zur Ausführung der Versuche in kleinerem Maßstabe kann der Apparat von **Arrhenius** Fig. 3561 (Lb, 48) benutzt werden (Viskosimeter).

Ein vertikales Kapillarrohr ist oben mit einer Erweiterung versehen und taucht unten in eine mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllte Flasche. Über und unter der Erweiterung befinden sich Marken, und das Volumen zwischen denselben ist bekannt. Man beobachtet die Zeit, die verfließt, bis dieses Flüssigkeitsvolumen durch die Kapillare unter dem eigenen Druck der Flüssigkeitssäule abgeflossen ist. Sind t und t' die Durchflußzeiten, s und s' die spezifischen Gewichte zweier Flüssigkeiten, so ist das Verhältnis ihrer Zähigkeiten:

$$\eta : \eta' = s.t : s'.t'.$$

632. Druckverteilung in Wasserleitungsröhren. Mit einem mit gefärbtem Wasser gefüllten, unten tubulierten Glaszylinder wird eine horizontal verlaufende lange und enge Glasröhre verbunden, durch welche das Wasser langsam ausfließt.

Fig. 3562.



In gleichen Abständen sind auf die Röhre oben offene vertikale Zweigröhren angelötet (Fig. 3562), in welchen man den Stand der Flüssigkeit messen und somit den Druck des Wassers an der betreffenden Stelle erkennen kann (Fig. 3563/64 E, 20 [1]).

An einer solchen Röhre kann man, wenn der Querschnitt der Röhre durch einen

Fig. 3563.

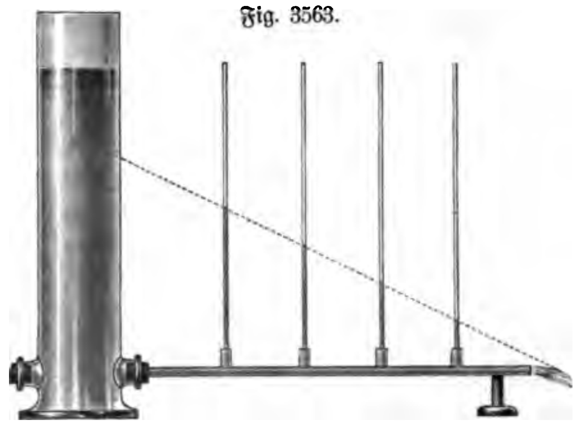
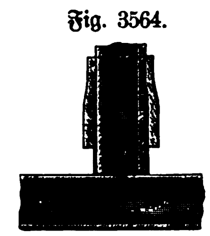


Fig. 3564.



eingelegten Glasstab passend verengt wird, das Ohmsche Gesetz nachweisen. Streng genommen gilt es allerdings nur für ein Bündel von Kapillarröhren, z. B. für einen Docht oder eine mit Sand, Erde, Baumwolle u. s. w. gefüllte Röhre. Für ein Bündel von n Kapillaren ist nach dem Poiseuilleschen Gesetz

[1] Liebrichs Nachf. in Gießen liefern einen Apparat mit fünf vertikalen Röhren und zwei Mariotteschen Gefäßen an den Enden zu 20 Mk.

$$V = n \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p}{l} \cdot \frac{R^4}{\eta} \cdot t,$$

somit, wenn man die Ausflußmenge pro Sekunde, die Stromstärke $V/t = J$ setzt, die Druckdifferenz $p = E$ und den Komplex der übrigen Faktoren mit $1/R$:

$$J = E/R \text{ cbm pro Sekunde},$$

wobei $R = s.l/q$, wenn l die Länge und q den Querschnitt des Röhrenbündels, welchem n proportional ist, und s eine Konstante, den spezifischen Widerstand, bedeutet.

Auch bei einer einfachen Röhre erweist sich aber die Niveaudifferenz zweier Manometerröhren einfach ihrem Abstand proportional, außerdem um so größer, je mehr der Querschnitt durch eingeschobene Stäbe verkleinert wird, vorausgesetzt, daß man den Wasserzufluß so reguliert, daß die Ausflußmenge, die z. B. durch einen Wasserzoll (S. 1389) kontrolliert werden kann, konstant bleibt. Es empfiehlt sich insbesondere, den Glasstab nur auf halbe Länge einzuschieben. Die punktierte Gerade der Fig. 3563 wird dann eine gebrochene Linie.



Fig. 3565. Fig. 3566.

Zur Messung der Stromstärke kann eine Wasseruhr, eventuell eine Kübelkette, ein Schöpfrad u. s. w. dienen.

Heyden (Z. 5, 33, 1891) demonstriert das Ohmsche Gesetz mittels eines gehörig genetzten, etwa 2 cm breiten und 80 cm langen Lampendochtes, durch welchen Wasser aus einem höher gelegenen Becken in einen tiefer stehenden Maßcylinder geleitet wird. Es wird die Änderung der übertretenden Wassermenge mit der Änderung der Niveaudifferenz, der Länge und des Querschnitts demonstriert. Im letzteren Falle werden Dochte verschiedener Breite oder Bündel von Dochten benutzt.

Grimsehl (Z. 8, 210, 1895) benutzt zwei tubulierte Flaschen, die beide zur Hälfte mit Wasser gefüllt und sowohl unten wie oben durch Gummischläuche verbunden sind oder zwei Paar solcher Flaschen (Fig. 3565 [1]).

Stellt man eine Flasche höher als die andere, so strömt das Wasser durch den unteren Schlauch, vergrößert den Luftdruck in der tieferen Flasche und vermindert ihn in der höheren, was sich besonders gut beobachten läßt, wenn man den oberen Schlauch zunächst durch eine Schlauchklemme verschließt. Die hervorgebrachte Druckdifferenz ist unabhängig von dem Drucke an einem beliebigen Punkte der äußeren (oberen) Leitung. Schaltet man in die untere Leitung eine Glasröhre von 0,5 mm Weite und 30 cm Länge, ein andermal zwei solche Röhren hintereinander, ein drittes Mal zwei parallel, wie Fig. 3566, so sind die inneren Widerstände bezw. 1, 2, 1/2.

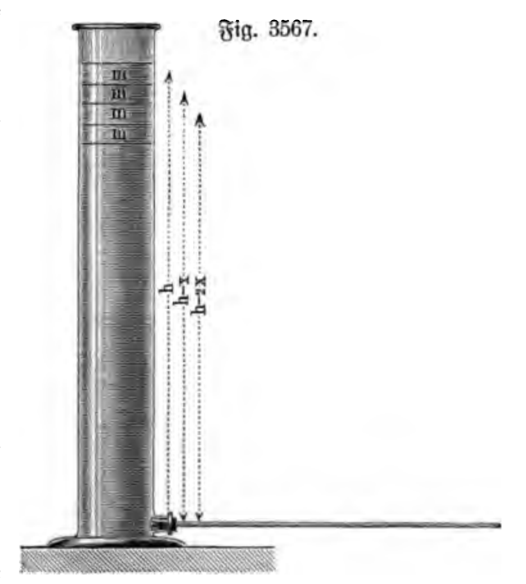
[1]) Zu beziehen von W. Apel, Universitätsmechaniker in Göttingen, zu 48 Mk.

In gleichem Verhältnis stehen die Zeiten, die der Ausfluß einer bestimmten Wassermenge aus dem oberen Gefäß in das untere beansprucht.

In ähnlicher Weise wird die Abhängigkeit der Stromstärke von dem Widerstande in der äußeren Leitung bestimmt, indem man in die Leitung Kapillarröhren entweder einzeln oder zu zweien parallel oder hintereinander einschaltet.

633. Stromarbeit. Um eine kleine Wassermenge von p Hyl (S. 732) unten in einen Behälter hineinzuschaffen, in welchem der Wasserstand E Meter beträgt, muß dieselbe Arbeit geleistet werden wie um das Wasser um E Meter zu heben, wobei es dann ohne weiteres oben aufgeschichtet werden kann. Dasselbe gilt, wenn die Wassermenge nicht direkt in den Behälter hineingeschafft wird, sondern durch eine Rohrleitung, in welcher der Druck von 0 bis E allmählich wächst. Nennt man die erforderliche Kraft k, die Länge der Röhre l, so ist die geleistete Arbeit $k . l$ Kilogrammeter. Man hat also:

$$k . l = g . p . E \text{ Kilogrammeter.}$$


Fig. 3567.

Der Effekt, d. h. die pro Sekunde zu leistende Arbeit ist, da in diesem Falle $p = J$ (J = Strom in Hyl),

$$k . l = g . J . E \text{ Kilogrammeter.}$$

Ist die in einem Wasserbehälter aufgespeicherte Wassermenge $= Q$ Hyl der Wasserstand E Meter, so ist, da der Schwerpunkt auf halber Höhe liegt, die aufgespeicherte potentielle Energie $= \frac{1}{2} . g . Q . E$ Kilogrammeter. Fließt das Wasser aus, so wird sie in Stromarbeit umgesetzt. Der Faktor $\frac{1}{2}$, welcher in der Formel für die Stromarbeit nicht auftritt, ist dadurch bedingt, daß die Stromstärke allmählich bis zu Null abnimmt (Fig. 3567); der Faktor g durch die Wahl des Hyl als Masseneinheit.

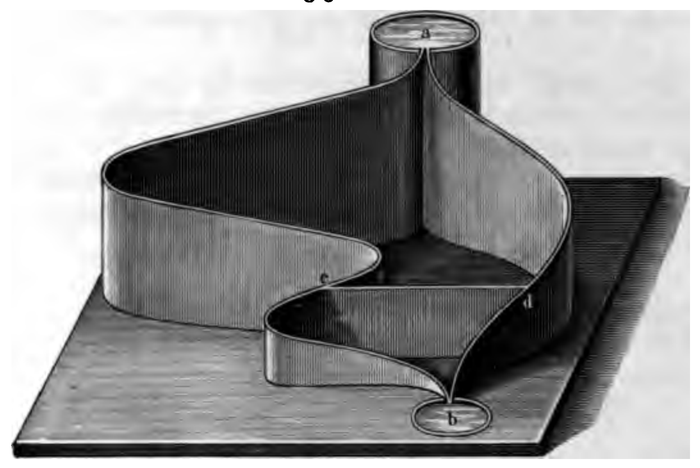
634. Stromverzweigung. Ein besonders einfacher Fall ist der Ausfluß aus zahlreichen, gleichabstehenden, gleichgroßen Löchern einer Röhre. Ich benutze dazu ein weites und ein enges Messingrohr mit vielen Öffnungen in gleicher Linie, aus welchen Wasserstrahlen in Rinnen aus wasserdichter Leinwand austreten.

Die Kirchhoffschen Gesetze der Stromverzweigung und verschiedene Analogien der später zu behandelnden Verzweigungen elektrischer Ströme pflege ich an größeren aus Blech hergestellten Modellen zu demonstrieren. Zur wirklichen Ausführung solcher Verzweigungen kann man z. B. ein verzweigtes Röhrensystem nehmen, welches eine Wheatstonesche Brücke darstellt.

Zur Veranschaulichung des Prinzips derselben kann das Modell Fig. 3568 dienen, welches die Verzweigung von zwei Wasserläufen darstellt. Von einem hochgelegenen Teiche a gehen zwei Kanäle acb und adb von gleichmäßigem Gefälle, aber ungleicher Länge zu dem tiefer gelegenen Teiche b. Zwischen den Punkten c und d ist ein Verbindungskanal ebenfalls von gleichmäßigem Gefälle, die sog.

Brücke, angelegt. Die Frage ist nun: welches ist die Richtung und Stärke des Wasserstromes in der Brücke? Es ist offenbar, daß, wenn die Punkte c und d gleiches Niveau haben, kein Wasserstrom in der Brücke zu stande kommen kann.

Fig. 3568.



Der Analogie mit elektrischen Versuchen halber erscheinen derartige Versuche recht lehrreich. Bedingung ist indes, daß die Röhren eng oder noch besser weit, aber

Fig. 3569.



mit einer porösen Masse (Glaswolle, Sand u. dergl.) ausgefüllt seien, welche der Begegnung des Wassers genügend Widerstand entgegensetzt, um die Bewegung als dem Ohmschen Gesetze folgend betrachten zu können[1]).

[1]) Siehe auch W. Wien, Lehrbuch der Hydrodynamik, Leipzig 1900, Hirzel.

Fig. 3569 (E, 54) zeigt einen derartigen Apparat, bei welchem die Wasserströmung in der Brücke durch einen eingesetzten Wasserzähler beurteilt wird.

Fig. 3570.

Durch Hintereinanderschaltung von zwei gleichen Kapillaren mit angesetzten Manometerröhren nach Fig. 3570 (Lb, 95) kann man insbesondere (nach Röntgen) auch die Abhängigkeit von der Temperatur nachweisen.

635. Stromlinien, Wirbelfäden werden sichtbar durch Einführung gefärbter Flüssigkeitsfäden (vgl. die Tafeln, welche die elektrischen und magnetischen Kraft-, Strom- und Niveaulinien darstellen). Brechung erfolgt an Verengungen und Erweiterungen, z. B. beim Einlegen von Glasstücken zwischen zwei parallele Glasplatten. Jaumann[1]) empfiehlt insbesondere folgende (in dem unten genannten Buche durch Abbildungen veranschaulichte) Beispiele: Quellen und Senken, Wirbel; Zusammensetzung zweier Strömungen, geradlinige Quirlströmungen; Brechung der Strom- und Niveaulinien; Wolkenschatten auf einem sonnigen Flusse[2]); sonnige Stelle auf einem schattigen Flusse[3]); Quellströmung in ungleichartigem Gebiete; Wirbel in ungleichartigem Gebiete; Quelle an der Schattengrenze; Wirbel in der Schattengrenze; geradlinige Quirlströmung (z. B. Wasser in einer Kapillare, wobei die Wandschichten zurückbleiben, so daß ein außerhalb der Achse eingesetztes Flügelrad sich drehen müßte) u. s. w.[4]).



Fig. 3571.

Einen Apparat nach Colladon (1887), um in einer Wassermasse Wirbel

[1]) Jaumann, Leichtfaßliche Vorlesungen über Elektrizität und Licht, Leipzig 1902, Barth. — [2]) Zusammenziehung der Stromlinien an einer kalt gehaltenen Stelle. — [3]) Auseinanderweichen der Stromlinien an einer erwärmten Stelle. — [4]) Über die Zeichnung solcher Tafeln siehe Holzmüller, Einführung in die Theorie der isogonalen Verwandtschaften, Leipzig 1882, Teubner.

zu erzeugen, welche den atmosphärischen Wirbelwinden ähnlich sind, zeigt Fig. 3571 (K, 120). (S. a. Elektrotechn. Zeitschr. 26, 350, 1905, Fig. 21 bis 23.)

636. **Trägheitswiderstand.** Im allgemeinen kommt bei Flüssigkeiten außer dem Reibungswiderstande, welcher der Geschwindigkeit proportional ist, auch der Trägheitswiderstande in Betracht, welcher mit dem Quadrate der Geschwindigkeit wächst, ja in den meisten Fällen, z. B. bei einem fahrenden Schiff, ist er außerordentlich viel größer als der Reibungswiderstand.

Der gesamte Widerstand wird Widerstand des Mittels genannt. Da die Stromlinien, um das fahrende Schiff beispielsweise, sich wieder schließen, also kein Wasser fortgestoßen wird, könnte man meinen, die Arbeit müsse gleich Null sein. Die Reibung bedingt indes, daß eine beträchtliche Menge von Wasser mitgenommen wird [1]). Vorübergehend wird aber auch ohne Reibung das Wasser bewegt.

Denkt man sich z. B. bei dem Versuche S. 1399 eine Kugel in Wasser fallend und nimmt an, daß die Reibung derselben gegen Wasser gleich Null wäre, so wird sie nichtsdestoweniger während ihrer Bewegung Wasser verdrängen, ihm also Geschwindigkeit mitteilen müssen. Die hierzu erforderliche Kraft ist einerseits proportional der hervorgebrachten Beschleunigung, also der Geschwindigkeit der fallenden Kugel, außerdem aber proportional der Masse des pro Sekunde verdrängten Wassers, welche ebenfalls mit der Geschwindigkeit der Kugel wächst. Der Widerstand muß also dem Quadrat der Geschwindigkeit entsprechen [2]).

Um dies zu demonstrieren, benutzt Fr. C. G. Müller einen Schwimmer von gleichem spezifischen Gewicht wie die Flüssigkeit, welcher durch Anhängen von Gewichten zum Sinken gebracht werden kann. Bei Anwendung des vierfachen Gewichtes gebraucht der Schwimmer nur die halbe Zeit, um bis zum Boden des Gefäßes zu gelangen. (Vgl. auch § 158, S. 832.)

Nutzanwendung von dem Trägheitswiderstande macht man z. B. bei Dämpfung schwingender Bewegungen. Beispielsweise werden vertikale Schwingungen durch einen mit dem Körper verbundenen Cylinder gedämpft, der sich in einem unten geschlossenen, nur wenig weiteren, mit Luft oder einer Flüssigkeit (Wasser, Glycerin) gefüllten Cylinder bewegt.

Fig. 3572.

Schwingungen um eine vertikale Achse dämpft man durch einen Flügel aus dünnem Blech in einem Gefäß mit Flüssigkeit. Die Wirksamkeit wird vermehrt, indem man das Gefäß durch feste Flügel, welche von den Wänden bis in die Nähe der Achse gehen, in Kammern abteilt (Fig. 3572) (Toepler). Genügen kleine Ausschläge, so nähert man einer mit der Achse verbundenen vertikalen Scheibe eine feste Fläche (W. Thomson).

Rotiert eine Scheibe im Wasser, so wird anscheinend kein Wasser verdrängt, da der von der Scheibe eingenommene Raum stets derselbe bleibt. In Wirklichkeit wird demnach durch Reibung eine beträchtliche Masse von Wasser in Bewegung gesetzt, es muß somit auch hier ein Trägheitswiderstand auftreten. Wie beträchtlich die in Bewegung gesetzte Masse sein kann, zeigt eine Kreiselpumpe, welche im einfachsten Falle lediglich aus einer solchen rotierenden Scheibe und einem dasselbe eng umschließenden Gehäuse mit Eintritts- und Ausflußöffnung besteht. Um größere Wirkungen zu erzielen ersetzt man die Scheibe durch ein Schaufelrad.

[1]) Siehe Riecke, Lehrbuch der Physik 1, 202, 1902. — [2]) Außerdem hängt er von der Form des Körpers ab, was z. B. mit verschieden geformten Schiffsmodellen gezeigt werden kann.

637. Kreiselpumpen. Ein kleines recht wirksames Modell einer Kreiselpumpe, genau einer in der Technik gebrauchten Kreiselpumpe nachgebildet, ist zu beziehen



Fig. 3575.

Fig. 3574.

Fig. 3573.

von der mechanischen Werkstätte von Welter in Mülhausen i. E., Belforterstraße. Dasselbe ist im Verhältnis zu seiner Größe sehr wirksam und fördert einen fingerdicken Strahl (Fig. 3573 K, 75).

Ein Modell einer Kreiselpumpe, welches zugleich als Modell eines Zentrifugalgebläses benutzt werden kann (Fig. 3574) beschreibt Hartl (Z. **10**, 126, 1897[1]). Bei Inbetriebsetzung muß zunächst das Steigrohr *b* abgeschraubt und das Gehäuse *C* wenigstens bis zur Mitte mit Wasser gefüllt werden[2]). Die erzeugte Druckdifferenz

[1]) Es ist zu beziehen von J. Antusch in Reichenberg. — [2]) Größere Zentrifugalpumpen nach Fig. 3575 u. Fig. 3576 liefern Fr. Gebauer, Maschinenfabrik, Berlin NW. 87,

wächst mit der Rotationsgeschwindigkeit. Graphische Darstellung der Beziehung ergibt die „Charakteristik“ der Pumpe.

Zur Demonstration benutze ich eine größere Zentrifugalpumpe auf eisernem Ständer, welche durch die Transmission im Auditorium betrieben wird. Ein eingeschaltetes Übertragungsdynamometer gestattet den Arbeitsverbrauch zu messen, also den Wirkungsgrad zu bestimmen.

Die Förderhöhe, d. h. der Druck, den eine Zentrifugalpumpe liefert, ist relativ gering, sie vermag aber große Stromstärke zu erzeugen. Immerhin kann man auch bedeutende Druckhöhen erzielen durch Hintereinanderschaltung mehrerer Zentrifugalpumpen, deren Schaufelräder auf derselben Achse befestigt sind. Eine solche Maschine nennt man eine Hochdruckzentrifugalpumpe[1]).

Fig. 3576.

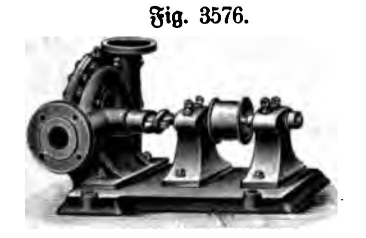


Fig. 3577. Fig. 3578.

Umgekehrt ist es möglich, durch Parallelschaltung von Pumpen sehr große Wassermassen zu bewältigen, z. B. Entwässerung ganzer Seen.

Von besonderem Interesse (mit Rücksicht auf elektrische Analogien) ist der Hinweis auf die durch eine Zentrifugalpumpe hervorgebrachten Niveaudifferenzen. Sind die beiden Gefäße, zwischen welchen die Pumpe angebracht ist, gleich weit, so sinkt im einen der Wasserspiegel ebensoviel als er im anderen steigt. Ist das eine sehr weit, so sinkt er in diesem fast gar nicht, nichtsdestoweniger ist die Niveaudifferenz dieselbe wie zuvor, d. h. im engen Gefäß steigt das Wasser auf die doppelte Höhe. Es empfiehlt sich, drei oder vier Gefäße (auf jeder Seite der Pumpe ein enges und ein weites) dauernd an die Leitung anzuschließen unter Zwischenschaltung von Hähnen, welche ermöglichen, das eine oder andere abzusperren.

Ferner kann man darauf hinweisen, daß eine Kombination von Wasserrad und Kreiselpumpe einen Transformator darstellt, der ermöglicht, Wasserstrom von großer Intensität und geringem Gefälle in solchen von geringer Intensität und großem Gefälle umzuformen. Das Wasser steigt unter Anwendung eines solchen Transformators scheinbar von selbst auf eine Höhe, die größer ist als die, aus der es herabgekommen ist. In Wirklichkeit ist es nur ein kleiner Teil des Wassers, die weitaus größere Masse sinkt auf tieferes Niveau.

In Verbindung mit einem Manometer kann eine Kreiselpumpe weiterhin als Tachometer dienen.

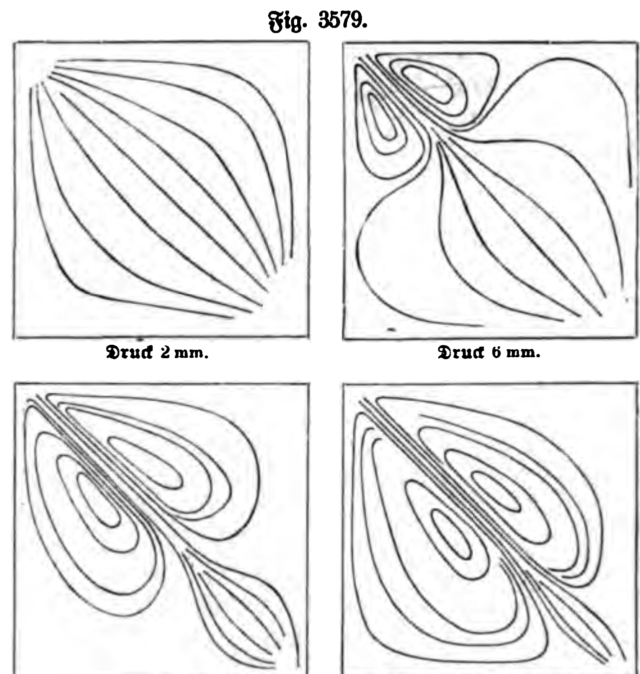
---

und Sonnenthal jun., Berlin C., Neue Promenade 6. Chemische Rührer nach Fig. 3577 liefert Gustav Müller in Ilmenau, Thüringen, zu 5,50 Mk.; außerdem Flügelrührer nach Gattermann (Fig. 3578), Glockenrührer nach Witt und Spiralrührer nach Mayerhoffer zu gleichem Preise. — [1]) Hochdruckzentrifugalpumpen sind zu beziehen von Weise u. Monski, Halle a. S. Mit Elektromotor gekuppelt zu beziehen von der Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vorm L. Schwartzkopff, Berlin W.

638. Kolbenpumpen wurden bereits auf S. 787 und 896 als statische Maschinen besprochen. Hier kann darauf hingewiesen werden, daß im Prinzip ihre Leistung wie die der Zentrifugalpumpe auf Überwindung des Trägheitswiderstandes des Wassers beruht. Das Altertum kannte nur stoßweise wirkende Pumpen ohne Heronsball, letzterer wurde erst von dem Nürnberger Zirkelschmied Hantsch (1654) beigefügt und dadurch die Pumpe viel leistungsfähiger gemacht. Besonders Leibniz hat sich bemüht (nach Gerland), die neue „rechtschaffene" Feuerspritze überall einzuführen. (Über Saugwindkessel siehe S. 990.)

639. Strahlbildung. Läßt man in einen großen, plattenförmigen, mit Wasser gefüllten Trog, dessen Seitenwände aus großen Spiegelglasscheiben bestehen, einen Wasserstrahl auf einer Seite einfließen, auf der entgegengesetzten Seite austreten, so wird, falls die Geschwindigkeit vollständig durch Reibung vernichtet wird, die Strömung in Linien sich vollziehen, welche den elektrischen Stromlinien gleichen und durch Beimischung feiner suspendierter Partikelchen, wie Sägespäne u. dergl., zur Anschauung gebracht werden können. Bei größeren Geschwindigkeiten tritt zunächst keine Ausbreitung der Strömung nach diesen Stromlinien ein, es bildet sich ein zusammenhängender Strahl, ringsum welchen das umgebende Wasser sich in Wirbelbewegung befindet (Fig. 3579) [1]).

Fig. 3579.



Nach Helmholtz tritt eine Zerreißung des Wassers an der Grenze des Strahles ein [2]). Das Gleichgewicht daselbst bleibt bestehen, weil der hydrodynamische Druck § 627, S. 1396) gerade gleich dem hydrostatischen Druck der umgebenden Flüssigkeit ist. Die Flüssigkeitsteilchen im Strahl behalten deshalb ihre Geschwindigkeiten nach dem Trägheitsgesetz und bewegen sich geradlinig weiter, werden aber schließlich durch Reibungswiderstände, die ihre Geschwindigkeit vermindern, also Anwachsen des hydrodynamischen Druckes bedingen, zur Ausbreitung gezwungen und folgen dann ähnlichen Stromlinien, wie man sie erhalten würde, wenn das Ende des Strahles Ausströmungsöffnung wäre [3]).

[1]) Siehe Riecke, Lehrbuch der Physik 1, 195, 1902. — [2]) Der wahre Grund ist der, daß sich die Bewegung vom Strahl nicht auf die benachbarten Schichten durch Reibung fortpflanzen kann, da diese vom Strahl sofort mitgerissen werden. — [3]) Ein Analogon bilden die Glimmlichtstrahlen (Kathodenstrahlen) bei elektrischen Entladungen.

Sehr auffallend zeigt sich die Reibung eines Wasserstrahls an umgebendem Wasser und die Mitbewegung des letzteren, wenn man einen Springbrunnen in einem größeren Behälter mit Wasser aufsteigen läßt und zwar so, daß sich die Ausströmungsspitze unter der Wasseroberfläche befindet. Je größer die Tiefe, um so dicker wird der Strahl und um so kleiner ist die erreichte Höhe, da sich die Energie auf eine entsprechend größere Wassermenge verteilt.

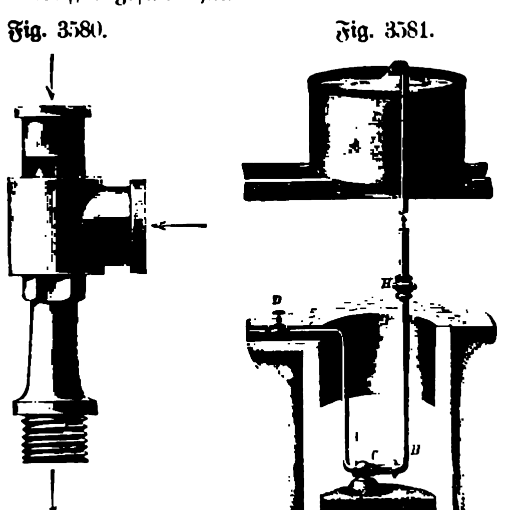
Diese saugende Wirkung von Wasserstrahlen zeigt besonders gut die Kellerpumpe (Wasserstrahlinjektor) (Fig. 3580) der Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover (Preis 50 Mk.)[1]).

Ich benutze dieselbe in der in Fig. 3582 dargestellten Weise auf einem eisernen Stativ montiert, wobei natürlich zunächst die Ausströmungsöffnung solange (durch einen Stopfen) verschlossen wird, bis sich das Gehäuse mit Wasser gefüllt hat.

Fig. 3582.



Fig. 3580. Fig. 3581.



Eventuell kann man auch die in der Figur sichtbare gläserne Wanne auf diese Weise füllen. Die in einem Blechtrog mit Schwimmer in 34 Sekunden aufgefangene Wassermenge bei etwa 2 Atm. Betriebsdruck war bei einem Versuch 113 Liter, die angesaugte Menge 63 Liter. Demgemäß hatten 50 Liter Betriebswasser 63 Liter Wasser aus der Wanne mit fortgerissen.

Durch Aneinandersetzung von Röhren verschiedener Weite, welche wie Fig. 3562 (S. 1401) mit Manometern versehen sind, kann man die Druckverhältnisse an Querschnittsverengungen und -erweiterungen zeigen. Durch Strahl- und Wirbelbildung infolge der Reibung werden die einfachen Verhältnisse, wie sie in reibungslosen Röhren auftreten (s. § 627, S. 1396), gestört.

640. Wirbelbewegungen in Flüssigkeiten. Halbe Wirbelringe kann man nach v. Helmholtz leicht in einer gefüllten Kaffeetasse beobachten, wenn man der Flüssig-

[1]) Fig. 3581 zeigt einen Elevator von Gebr. Körting, Preis 20 bis 160 Mk.

it mit dem nur mit der Spitze eingetauchten Löffel einen schwachen Stoß erteilt. Man sieht dann auf der Oberfläche zwei sich im entgegengesetzten Sinne drehende Wirbel, welche die Enden eines in der Flüssigkeit existierenden halben Wirbelringes darstellen. Indem man zwei oder mehrere derartige Wirbelringe einander folgen läßt, kann man deren gegenseitige Einwirkung beobachten.

Bestäubt man Wasser mit feinem, glänzendem Metallstaub, taucht ein Stäbchen ein und führt es fort, so entstehen hinter demselben ebenfalls sehr deutliche Wirbel. Ebenso bei käuflicher flüssiger Bronzefarbe.

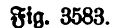


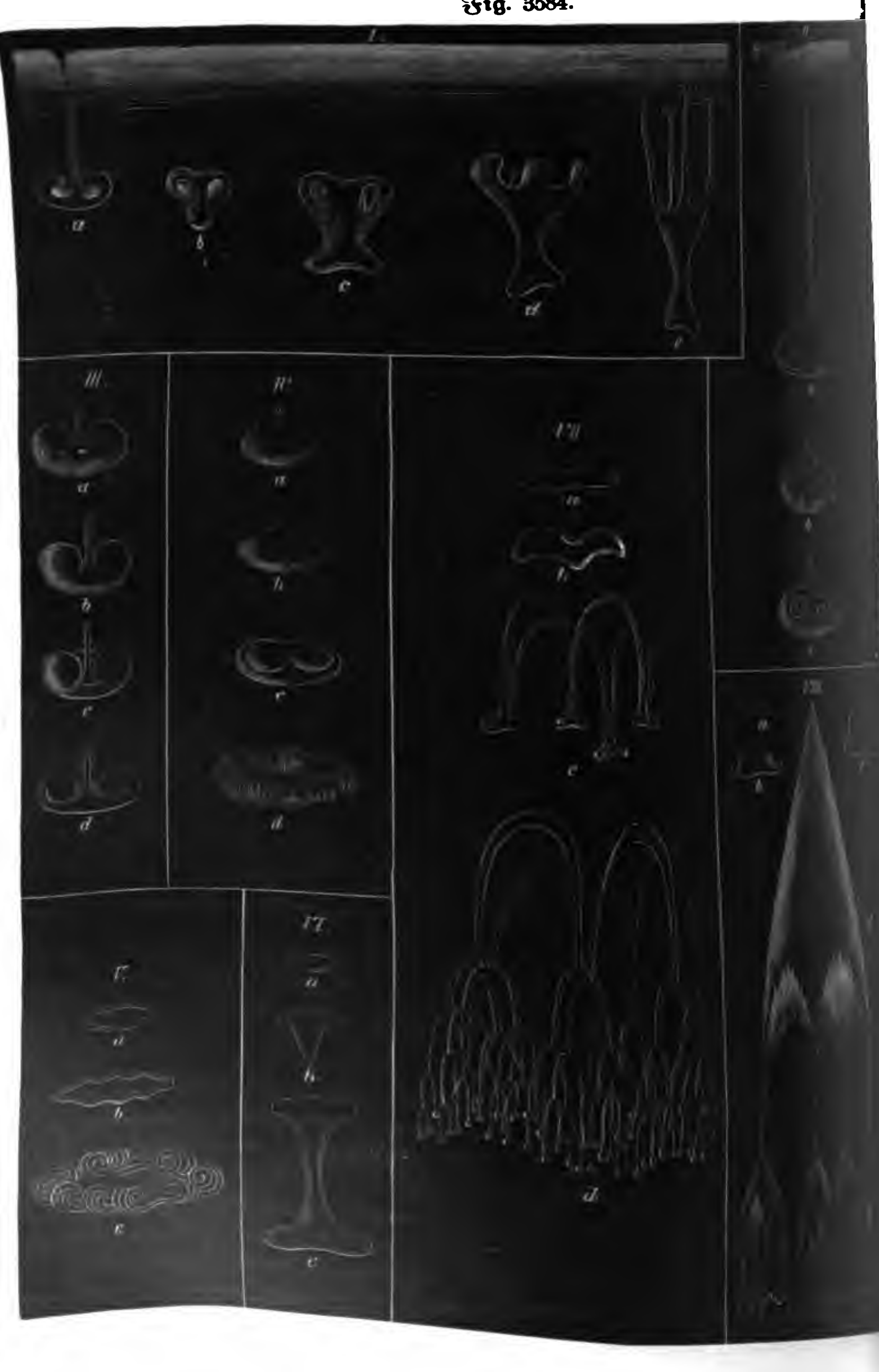
Fig. 3583.



Sehr schön lassen sich die Wirbelbildungen beobachten nach Oberbeck, wenn eine kleine Menge gefärbten Wassers unter sehr geringem Überdruck in ungefärbtes eintritt. Man beobachtet dann Formen, wie sie in den Fig. 3583 a bis m dargestellt sind.

641. Kohäsionsfiguren. Läßt man nach Tomlinson einen Tropfen von Cochenillelösung (in destilliertem Wasser) in ein cylindrisches Glas fallen, welches mit einer Lösung von Alaun oder oxalsaurem Ammoniak gefüllt ist, so bildet sich der niedersinkende Tropfen zu sehr merkwürdigen und zierlichen Figuren aus; zunächst entsteht ein farbiger Ring, der sich in gekrümmte Doppellinien auflöst, von welchen aus dann Ausläufer nach unten ausgesendet werden, die sich jeweils wieder in zwei verzweigen, so daß ein vielfach verästeltes, farbiges Gebilde entsteht. Karbolsäure in Olivenöl getropft bildet Figuren, aus einem dünnen Stiel mit einem fast kugelförmigen Knollen am Ende bestehend, in welchem sich eine wirbelnde Bewegung

Fig. 3584.



zeigt. Ähnliche Beobachtungen sind auch von Rogers und Reusch (1860) gemacht worden. (Fig. 3584 I bis VIII)[1]).

Erzeugt man diese Figuren in einem Glastrog mit planparallelen Wänden, so lassen sie sich (nach Liesegang) leicht mittels des Projektionsapparates objektiv machen[2]).

Man füllt den Glastrog bis 12 mm unter den Rand mit Weingeist und stellt ihn in die Laterne. Dann taucht man einen Glasstab in flüssige Anilinfarbe und berührt damit die Seite des Glastroges leicht, so daß ein Tropfen hängen bleibt. Dieser Tropfen geht, sobald er den Alkohol berührt, 12 mm ungefähr gerade hinunter und verzweigt sich dann in zwei Arme, diese teilen sich in vier und so fort; bis die Farbe unten angelangt, hat sie sich in hunderte zarter Fäden getrennt. Auf der Wand zeigt sich dies noch viel schöner, da das Bild umgekehrt kommt, es wächst hier ein starker Baum auf, der sich allmählich verzweigt. Noch hübscher ist es, wenn man Tropfen verschiedener Farben 12 mm weit auseinander ansetzt; ihre Zweige verwirren sich und das Ganze erinnert an das Aufsteigen verschiedenfarbiger Raketen. Schließlich tritt Diffusion ein. Eine andere Figur wird durch gefärbtes Fuselöl in Petroleum erhalten. Sehr schöne, sich vielfach teilende Wirbelringe zeigt besonders Lavendelöl in Alkohol eingetropft.

Ich selbst benutze gewöhnlich außer dem eben genannten Lavendelöl, welches sehr zierliche und feine Figuren bildet, mit Anilinfarben gefärbtes Glycerin in verdünntes Glycerin und grün gefärbten Amylalkohol in Petroleum aus kleinen Trichterchen mit Baumwollefilter eintropfend.

In manchen Fällen werden die Wirkungen dadurch kompliziert, daß an der Grenze der fallenden Tropfen Oberflächenspannung vorhanden ist, oder daß sich dort eine dünne Niederschlagsmembran ausbildet.

Martini schichtet in einem Wassergefäß zwei mischbare Flüssigkeiten von nur wenig verschiedener Dichte, z. B. Wasser und wässerige Lösung von Salz oder Zucker, oder mit Schwefelsäure angesäuertes Wasser übereinander und überläßt sie zunächst einige Stunden der Ruhe, bis völliges Gleichgewicht eingetreten ist. Unten ist die Glasflasche durchbohrt zur Aufnahme einer Kapillarröhre, welche durch einen Gummischlauch mit einem Behälter mit gefärbtem Alkohol in Verbindung steht. Läßt man nun den Alkohol durch Heben des Behälters in die Glasflasche einströmen, so steigt derselbe zunächst als dünner spiralförmiger Faden in die Höhe, breitet sich aber, sobald er die Grenzschicht durchdringt, zu hübschen, baumartigen Figuren aus (Diffusionsfiguren). Besonders schön erscheinen diese Figuren, wenn man Lösungen von Chininsulfat oder Äskulin statt des gefärbten Alkohols verwendet und den Apparat mit violettem Lichte beleuchtet.

Nach Belas (Beibl. 28, 1044, 1904) können Wirbelringe in Flüssigkeiten sehr schön erhalten werden, wenn man aus einer feinen unter die Oberfläche untertauchenden Spitze Fluoresceinlösung in Wasser austreten läßt. Man erhält zunächst einen feinen, gerade abwärts gehenden Strahl. Gibt man nun aber auf die den Trichter haltende Stütze einen senkrechten Schlag, so bildet sich ein Wirbelring. Ein zweiter Schlag bringt einen zweiten hervor, der durch den ersten hindurchgeht, u. s. w.

---

[1]) O. Lehmann, Molekularphysik I, S. 281, wo auch die Erklärung der Buchstaben gegeben ist. — [2]) Ich verwende dazu den 6 m großen Schirm (S. 175), auf welchem die Einzelheiten sehr schön hervortreten.

Sirup mit Fluorescin gefärbt, in einen hohen Standcylinder mit Wasser getropft, läßt den Einfluß der inneren Reibung im **Sirup** erkennen.

Zur Demonstration des Einflusses der **Viskosität** der **ruhenden** Flüssigkeit kann man einen Tropfen Methylenjodid durch eine Schicht Mineralöl fallen lassen, welche sich über einer spezifisch nahe gleich schweren Schicht einer Mischung von Schwefelkohlenstoff und Benzol befindet.

Hierher gehören auch die „**stillstehenden Tropfen**“ von **P. du Bois-Reymond** (1854). In einem hohen Standcylinder werden zwei Alkoholwassermischungen von verschiedenem spezifischen Gewicht, aber beide leichter als Leinöl, übereinander geschichtet und nun ein Tropfen Leinöl hineingebracht. Sobald dieser die Grenzfläche erreicht, prallt er von ihr wie von einer elastischen Fläche zurück, bleibt dann für kurze Zeit unbeweglich und beginnt nun erst weiter zu sinken. Ebenso verhält sich eine Wachskugel.

Bringt man nach **Wheeler** (1883) in eine nahezu gesättigte Salzlösung (z. B. Eisensulfat mit etwas Schwefelsäure) ein Stück Zink und gießt vorsichtig über diese Lösung Wasser, so bemerkt man, wie die aufsteigenden Wasserstoffblasen

Fig. 3585.



zuerst an der Grenzschicht der Salzlösung und des Wassers Halt machen, ja zum Teil wieder etwas abwärts oder seitwärts gehen, ehe sie ganz aufsteigen.

Decharme (1881 und 1885) erzeugt **Bewegungsfiguren**, indem er durch Ultramarin blau gefärbtes Wasser unter Wasser auf eine mit Mennige bedeckte Platte kurz ausströmen läßt (Fig. 3585).

642. Wasserscheibe und Wasserglocke. Zwei horizontal gegeneinander treffende Strahlen von etwa 3 mm Dicke erzeugen eine schöne, fast kreisrunde, am Rande in Strahlen sich auflösende **Wasserscheibe**. Dieselbe ist vollkommen eben bei gleicher Intensität der beiden Strahlen, glockenförmig bei ungleicher.

Läßt man (nach **Bourdon**, 1884) zwei Wasserstrahlen (Druck [illegible]) auf einander treffen, von denen der obere aus einem cylindrischen Rohr von 2 [illegible] Durchmesser, der untere aus einem gleich weiten, sich kegelförmig (12°) erweiternden austritt, so erhält man eine schöne, unten offene, durchsichtige und [illegible] Wasserglocke von [illegible] Durchmesser.

Steckt man einen sehr dünnen Kupferdraht in vertikaler Richtung in den [illegible] Teil der Wasserglocke, so teilt sie sich und man kann eine [illegible], eine brennende Kerze, einen [illegible] mit [illegible] u. s. w. unter dieselbe stellen, ohne daß die Gegenstände benetzt werden (Fig. [illegible]).

Bei geringerem Druck schließt sich die Glocke unten, d. h. zieht sich zu einem Strahl zusammen wie Fig. 3587 andeutet, wodurch ein nach unten zugespitzter Luftraum von dem Wasser umflossen wird.

Fig. 3586. Fig. 3587.



643. Stoßwirkung des Wassers. Zur Messung der Stoßwirkung des Wassers lasse ich einen Wasserstrahl senkrecht gegen eine ebene Platte oder halbkugelförmige Schale stoßen, welche auf einer Federwage befestigt ist (Fig. 3588). Die an letzterer

Fig. 3588.



abgelesene Stoßkraft wird sodann verglichen mit derjenigen, welche sich aus der Ausflußmenge und Geschwindigkeit des Strahls ergibt. Zur Bestimmung der Ausflußgeschwindigkeit wird in bestimmtem Momente ein passend gebogenes weites Blechrohr untergeschoben, welches den Strahl in einen hohen Maßcylinder von 16 Liter Inhalt ableitet. Gleichzeitig wird die Sekundenuhr in Tätigkeit gesetzt und wieder angehalten, sobald der Cylinder sich gefüllt hat.

Bedeuten k die an der Wage gemessene Stoßkraft des Strahles in Kilogramm, m die Masse des pro Sekunde ausfließenden Wassers in Hyl und v dessen Geschwindigkeit in Meter-Sekunden, so ist, da die Wasserteilchen rechtwinkelig abgelenkt werden, also die gesamte Geschwindigkeit in der ursprünglichen Richtung verloren geht,

die Verzögerung $= v$ und $k = m.v$. Beispielsweise wurde die Ausflußmenge zu 13 Liter $= 13.10^{-3}$ cbm in 14 Sekunden gefunden, also $m = \frac{13}{14.9{,}81}$ Hyl und, da der Querschnitt des Strahles $q = 3{,}1.10^{-4}$ qm war,

$$v = \frac{13.10^{-3}}{14.3{,}1.10^{-4}} = \frac{13.10}{14.3{,}1},$$

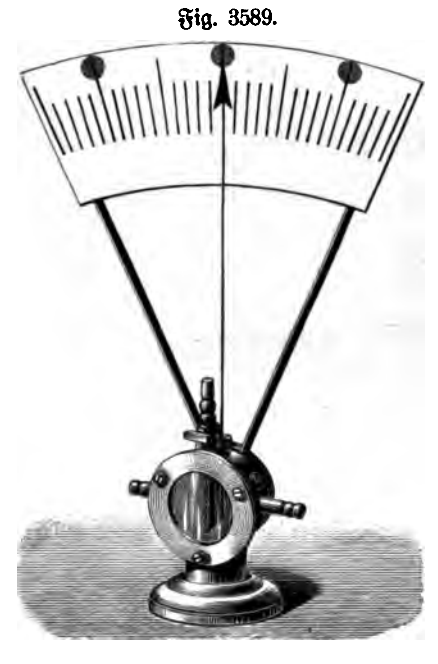
somit

$$k = \frac{13^2.10}{14^2.9{,}81.3{,}1} = 0{,}282\,\text{kg}.$$

In der Tat zeigte die Wage annähernd diese Kraft an.

644. Stromstärkemesser. Da die Stoßkraft von der Stromstärke abhängt, kann man die Skala der Federwage beim vorigen Versuch so eichen, daß direkt die Wasserstromstärke abgelesen werden kann.

Fig. 3589.



Szymański (1889) bedient sich des in Fig. 3589 dargestellten Apparates. Das Ende eines langen Zeigers, welcher durch eine Gummimembran mittels zweier Schraubenmuttern luft- und wasserdicht durchgeführt ist, trägt am unteren Ende einen Flügel aus Messingblech, der in die Kapsel hineinragt, deren Deckel die Gummimembran bildet. Zwei Ansatzröhrchen gestatten, Wasser (oder Luft) durch die Kapsel zu leiten.

645. Gleichgewicht einer Kugel auf Wasserstrahl. Der Versuch, eine Kugel auf einem Springbrunnen tanzen zu lassen, ist leicht auszuführen. Man umgibt das Mundstück des Springbrunnens mit einem trichterförmigen Drahtnetz, damit die Kugel, wenn sie zufällig heruntergefallen ist, von selbst wieder aufsteigt. Der auf die Kugel stoßende Strahl zerteilt sich, falls sich die Kugel nicht in der Achse befindet, in ungleich starke Teilstrahlen, deren Wirkung auf die Kugel eine verschiedene ist, so daß diese gegen die Achse hingetrieben wird. Ich benutze eine Celluloidkugel von etwa 7 cm Durchmesser, auf 5 m hohem Strahl von 1 cm Durchmesser.

646. Konkave und konvexe Flächen. Den verschiedenen Widerstand derselben demonstriert Hartl mittels einer Zeigerwage nach Fig. 3590, an welche er einen Hohlkegel in der Stellung Fig. 3591 a oder b anhängt und in ein Glas Wasser eintauchen läßt [1]). Wird dieses heruntergeschoben, so ist der Ausschlag bedeutend größer im Falle der Stellung Fig. 3591 a, als im entgegengesetzten Falle. Gleiches gilt für die Stoßwirkung eines Wasserstrahles.

[1]) Der Apparat ist zu beziehen von W. J. Rohrbecks Nachf., Wien I, Kärntnerstr. 59, zum Preise von 90 Kronen.

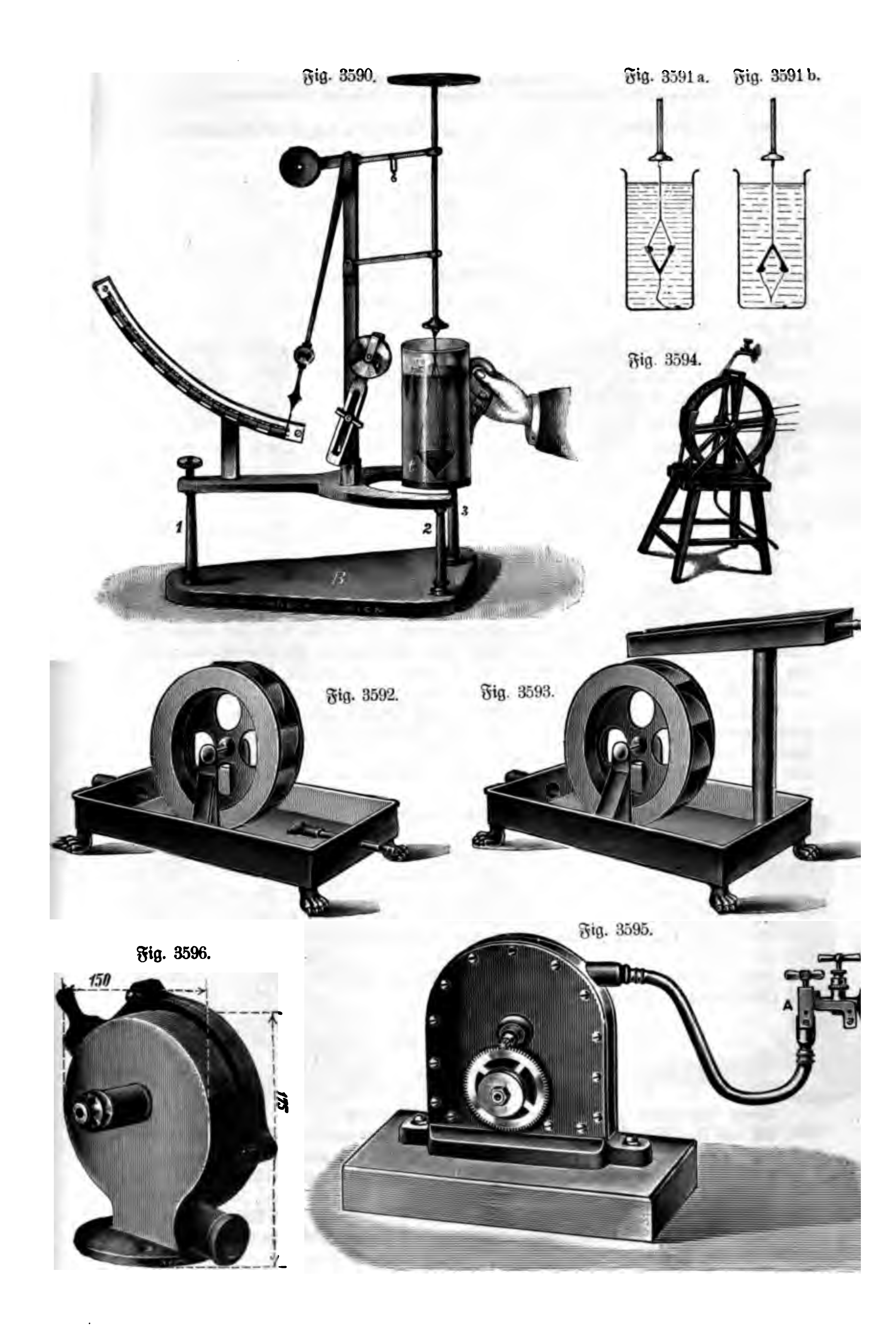


Fig. 3590. Fig. 3591 a. Fig. 3591 b. Fig. 3594. Fig. 3592. Fig. 3593. Fig. 3596. Fig. 3595.

647. Wasserräder. Die Verwertung der Stoßkraft des Wassers zum Betriebe von Wasserrädern (Fig. 3592 u. 3593 Lb, je 15) kann namentlich in der Hinsicht einer näheren Untersuchung unterworfen werden, welches die maximale effektive Leistung oder der tatsächliche Wirkungsgrad ist. Der theoretische beträgt im günstigsten Falle 50 Proz., dann nämlich, wenn die Umfangsgeschwindigkeit des Rades die Hälfte der Geschwindigkeit des Wasserstroms ist. Die Messung stößt allerdings insofern auf Schwierigkeiten, als die Wasserräder, falls sie erheblichen Effekt geben sollen, große Wassermengen von geringem Druck verbrauchen, also das Vorhandensein einer Niederdruckwasseranlage (S. 128) voraussetzen. Was die im Handel zu beziehenden Modelle[1]) anbelangt, die sich für Demonstration eignen, so kommen hauptsächlich in Betracht Wassermotoren für chemische Zwecke, Peltonwasserräder für hohen Druck und Turbinenmodelle.

Bezeichnet man die sekundlich zum Stoße gelangende Wassermasse mit m, ihre Geschwindigkeit mit v, die der Radschaufeln mit c, so ist der Druck k, welchen das Wasser gegen die Schaufeln ausübt,

$$k = m(v - c),$$

d. h. gleich der Stoßkraft eines auf eine ruhende Fläche mit der Geschwindigkeit $v - c$ auftreffenden Strahles.

[1]) Ein oberschlägiges Wasserrad zum Betrieb mit der gewöhnlichen Wasserleitung nach Ackermann, speziell für chemische Arbeiten bestimmt, nach Fig. 3594, liefern Max Kähler und Martini, Berlin N., Chausseestr. 3, zu 50 Mk. (der Radius des Rades beträgt 35 cm); eine kleine Turbine zum Anschluß an die Wasserleitung nach Fig. 3595 die Leipziger Lehrmittelanstalt (Dr. O. Schneider) Leipzig, Windmühlenstr. 39, zu 12,75 Mk. Eine andere kleine Turbine von Rabe zeigt Fig. 3596 (K, 20).

Kleine vertikale Wasserräder in geschlossenem Gehäuse zum Betriebe mit Wasserleitungswasser liefert F. A. Herbertz in Köln. Dieselben erfordern etwa drei Atmosphären Wasserdruck und bei $^1/_{20}$, $^1/_{10}$, $^1/_8$, $^1/_6$ oder $^1/_4$ Pferdestärke bezw. 4, 8, 10, 12 und 24 Liter Wasser pro Minute. (Preis der kleinsten Sorte 50 Mk.) Vergl. auch S. 103.

Franz Hugershoff in Leipzig, Karolinenstr. 13, liefert ähnliche Motoren verbesserter Konstruktion nach Fig. 3597 a, b zu 25 bis 35 Mk.

Peltonwasserräder gleichen äußerlich einer Zentrifugalpumpe (Fig. 250, S. 128, s. a. Fig. 3575, 3576, S. 1407). Die Beschaffenheit des Rades zeigt Fig. 3598; sie sind zu beziehen von Briegleb, Hansen u. Co., Gotha 7, oder von The Pelton Water Wheel Co., 127, Main Street, San Francisco, California, oder 143, Liberty Street, New York City.

Hammerl (Z. 9, 39, 1896) benutzt eine 3pferdige Turbine von Rüsch in Dornbirn für 10 Atm.

Kleine Turbinen für 5,5 Atm. Druck liefert die Maschinenfabrik von B. Schmidt in Zell (Wiesenthal in Baden) mit:

	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4,2	4,8	5,5 Pferdekräften
zu	120	165	250	350	440	530	620	800	900	1000 Mk.

Der Wasserverbrauch pro Sekunde beträgt:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 Liter.

Einige sehr primitive Turbinenmodelle zeigen ferner die Fig. 3599 (E, 65), Fig. 3600 (Lb, 18) und Fig. 3601 (K, 20); größere Fig. 3602 (E, 145) und Fig. 3603 (K, 165). Dieselben gebrauchen ziemlich viel Wasser, wenn die Leistung eine erhebliche sein soll.

Man unterscheidet Achsialturbinen (Henschel-, Jonval-, Girard-Turbinen) und Radialturbinen (Francis-, Schwammkrugturbinen, Pelton räder), je nachdem das Wasser von der Achse nach dem Umfang oder umgekehrt verläuft. Der Wirkungsgrad beträgt 75 bis 80 Proz., während oberschlägige Wasserräder bei günstigem Gefälle höchstens 70 bis 75 Proz. haben.

Der Effekt E, mit welchem das Rad umgedreht wird, ist daher

$$E = k.c = m(v - c)c;$$

dieser Wert wird am größten, wenn die Schaufeln die halbe Geschwindigkeit des aufschlagenden Wassers haben, also wenn $c = \frac{1}{2}v$, wie sich leicht beweisen läßt. Setzt man vorläufig $c = \frac{1}{2}v \pm x$, so erhält man

$$E = m(\frac{1}{4}v^2 - x^2),$$



Fig. 3597 a. Fig. 3597 b. Fig. 3601. Fig. 3599. Fig. 3598. Fig. 3600.

woraus folgt, daß E am größten ist, wenn $x = 0$ und somit $c = \frac{1}{2}v$. Der größte Effekt des Rades ist daher

$$E = \frac{1}{4}mv^2.$$

Die gesamte kinetische Energie des pro Sekunde aufstoßenden Wassers ist $\frac{1}{2}mv^2$; folglich ist der größte Effekt des unterschlägigen Wasserrades höchstens gleich dem halben Effekte des aufschlagenden Wassers.

Die Messung des tatsächlichen Effektes, welche bei kleinen Wasserrädern durch Aufwindenlassen eines Gewichtes durch eine um eine Trommel sich wickelnde (geklöppelte) Schnur, welche außerdem über eine Rolle an der Decke geführt ist, geschehen kann, bei größeren mittels einer Bandbremse, ergibt einen bedeutend kleineren Wirkungsgrad.

Zu beachten ist, daß bei den kleinen Motoren, bei welchen das Wasser aus einer Spitze gegen das Rad spritzt, der Wirkungsgrad sich sehr ungünstig gestaltet, wenn man die Regulierung statt durch Regulierung der Ausströmungsspitze durch einen vorgeschalteten Hahn vornimmt, da dann die Hauptarbeit des Wasserstromes bei der Drosselung im Hahn, statt am Wasserrade geleistet wird, auf welches das Wasser nur noch mit geringer Geschwindigkeit auftrifft.

Fig. 3602.



Fig. 3603.



Ich benutze zu messenden Versuchen eine Turbine nach Fig. 3603, welcher Wasser aus der zweizölligen Wasserleitung (S. 22) zugeleitet wird. Die Durchflußmenge beträgt 90 Liter in 30 Sekunden, somit 3 kg pro Sekunde, bei einem Gefälle von 0,34 m. Theoretisch wäre somit der Effekt = 0,34 . 3 = 1,02 Kilogrammeter, die effektive Arbeit wird gemessen mittels einer Bandbremse. Die Belastung beiderseits beträgt 500 g (mit Wagschale), das Übergewicht auf einer Seite 1 kg. Da in einer Sekunde eine Umdrehung erfolgt und der Radius der Rolle, um welche das Band gelegt ist, 0,018 m beträgt, so ist der Effekt = 6,28 . 0,018 = 0,1125 Kilogrammmeter pro Sekunde, der Wirkungsgrad somit 11 Proz.

648. Hydrodynamische Mühle. An die Besprechung der Wasserräder kann man auch die der Woltmannschen hydrodynamischen Mühle (Fig. 3604 K, 135 u. 3605 E, 45) anschließen, welche zum Messen der Geschwindigkeit von fließendem Wasser gebraucht wird. Sie ist nichts anderes als ein mit einem Tourenzähler

Fig. 3604.

Fig. 3605.

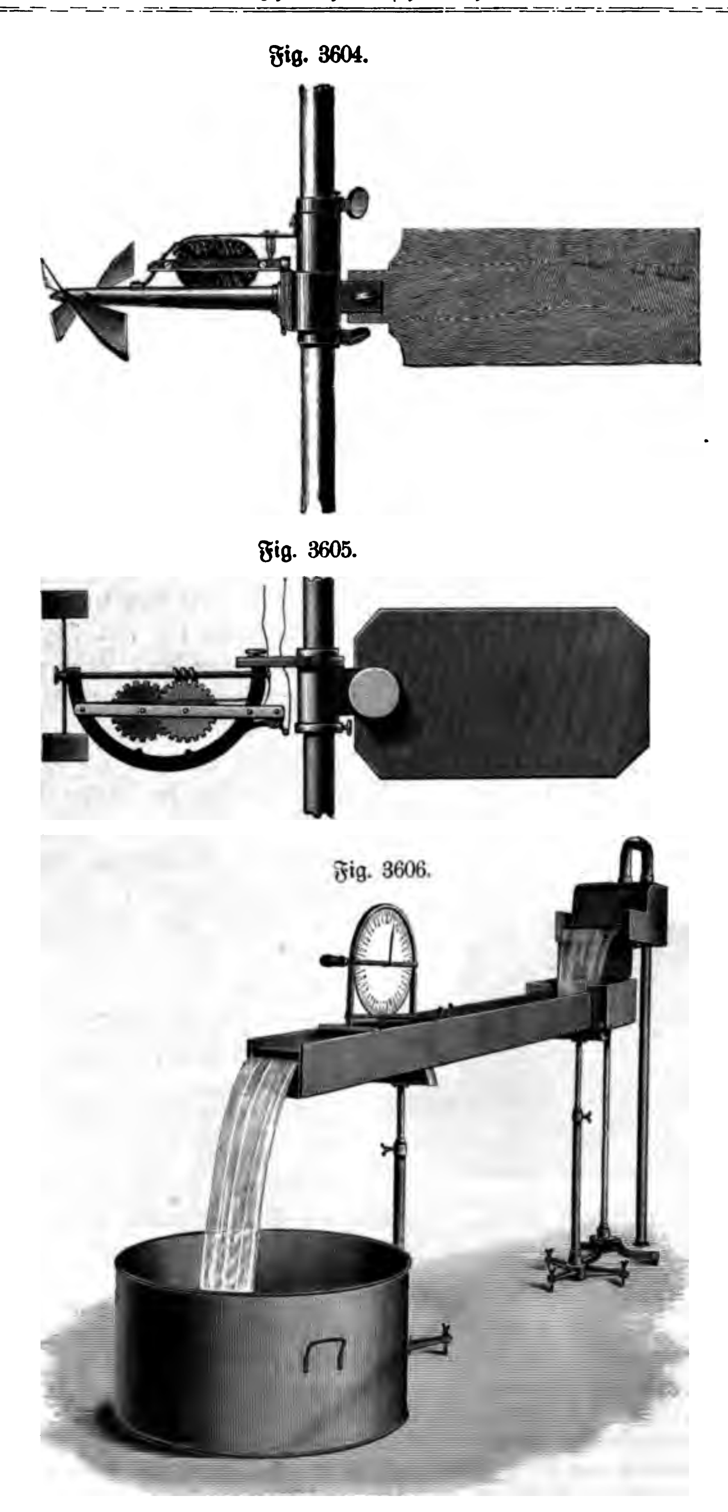


Fig. 3606.

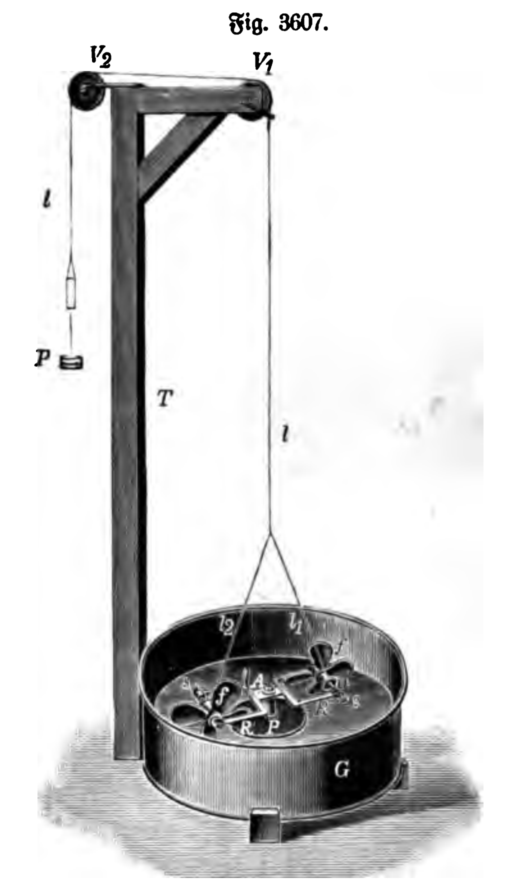
verbundenes Wasserrad, dessen Geschwindigkeit durch die konstante Stoßkraft des Wassers anwächst bis zu einem Maximum, welches dadurch bestimmt ist, daß bei

Überschreitung desselben das Rad dem Wasser eine größere Geschwindigkeit mitteilen würde, als es besitzt, wodurch natürlich die Bewegung des Rades alsbald gedämpft wird [1]).

Zur Demonstration benutze ich ein kleines Rad mit sehr großem Tourenzähler in einem weiten Gerinne, aus welchem das Wasser in einen Aufsatz auf der Abflußleitung fließt (Fig. 3606).

Im Prinzip gehören auch die gewöhnlichen Wassermesser hierher, bei welchen ebenfalls ein Flügelrad durch den Wasserstrom in Bewegung gesetzt wird (S. 782).

Fig. 3607.



Nach gleichem Prinzip kann auch die Geschwindigkeit eines Schiffes im Wasser bestimmt werden. Ein hierzu geeignetes Flügelrad mit Tourenzähler wird als Log oder Sillometer bezeichnet [2]).

Eine Umkehrung der Vorrichtung in großem Maßstabe ist die Schiffsschraube.

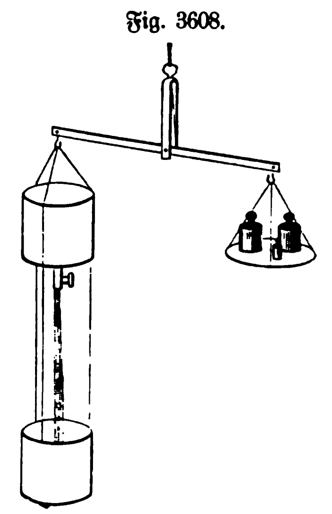
649. Die Archimedische Schraube wurde früher (S. 785, Fig. 2313) als Pumpe besprochen. Läßt man Wasser dagegen strömen, so wirkt sie als Wasserrad. In ähnlicher Weise, wie ein solches mechanisch betrieben zur Fortbewegung eines Schiffes im Wasser dienen kann (Raddampfer), ebenso kann auch die Schraube zu gleichem Zwecke dienen (Schraubendampfer). Fig. 3607 zeigt ein Modell der Schiffsschraube nach Hartl (Z. 10, 234, 1897). Die beiden Schrauben, welche sich in dem mit Wasser gefüllten Gefäß *G* bewegen, werden durch den Zug des Gewichtes *P* in Umdrehung gesetzt. Infolgedessen kommt das System in Rotation. Dreht man mit der Hand den Rahmen, in welchem die beiden Schrauben gelagert sind, im entgegengesetzten Sinne, so geraten die Flügelschrauben durch den Widerstand des Wassers in Rotation, so daß sich die Schnüre *l1* und *l2* aufwickeln und das Gewicht *P* heben [3]).

---

[1]) Zu beziehen von A. Ott, math.-mech. Institut Kempten, Bayern; Ludwig Tesdorpf, Stuttgart; F. Ertel u. Sohn, München, Luisenstraße 27. — [2]) Patentlogs liefert Aug. Carstens, Hamburg, Fabr. Steinhöft 19, Admiralsstraße 38. — [3]) Ein Modell der Resselschen Schiffsschraube, bestehend aus einem leichten Kahne von lackiertem Blech, an dessen Boden ein Uhrwerk angebracht ist, welches mittels einer Feder aufgezogen wird, ist zu beziehen von Dr. Houdek und Hervert in Prag (Preis 18 fl.). Dasselbe bewegt sich mit mäßiger Geschwindigkeit auf dem Wasser, so daß man die Wirkung der Schraube gut verfolgen kann.

650. Reaktion. Das Wesen der Reaktion wird besonders gut erläutert durch den in Fig. 3608 skizzierten, von Galilei angegebenen Apparat, bestehend aus einer Wage, auf welcher ein Wasserausflußgefäß nebst Auffangeschale tariert ist. Öffnet man den Hahn, so steigt infolge der Reaktion das Wassergefäß in die Höhe; stößt dann der Strahl auf die Schale auf, so wird das Gleichgewicht wieder hergestellt. Zur Wirkung der Reaktion gesellt sich noch die Gewichtsverminderung durch das in der Luft schwebende Wasser, andernfalls würde durch den Stoß des Wassers auf die Schale das Gleichgewicht in entgegengesetzter Weise gestört werden müssen. Der Stoß des Wassers ist also gleich dem Reaktionsdruck und dem Gewichte des in der Luft schwebenden Wassers, also um so größer, je größer der durchlaufene Weg. Die Klappe öffnet man zweckmäßig durch Abbrennen eines Fadens. Man erkennt bei dem Apparate besonders deutlich, daß die Reaktion nicht auf einer Stoßwirkung des Wassers, wie bei den eben erwähnten Turbinen beruht, sondern auf dem Druck des Wassers in der Ausflußöffnung, welcher nach allen Seiten gleichmäßig wirkt [1]. Sie ist gewissermaßen ein System unendlich vieler wahrer Kräfte (S. 665) mit je zwei Angriffspunkten, von welchen nur die eine, deren Achse mit der Ausflußrichtung übereinstimmt, zur Wirkung kommen kann, wobei dann, dem allgemeinen Gesetz entsprechend, Wirkung und Gegenwirkung einander gleich sein müssen, so daß das Wasser im Gefäß denselben Antrieb nach oben erhält (Reaktion), wie der Strahl nach unten (Ausflußgeschwindigkeit). Tatsächlich handelt es sich allerdings nach der kinetischen Theorie hier nicht direkt um wahre Kräfte, sondern um die Trägheitskräfte der stoßenden Moleküle. Alle Bewegungsrichtungen sind vor dem Ausfluß gleichmäßig vertreten, durch den Ausfluß werden die abwärts bewegten Moleküle entzogen, somit bleibt ein Überschuß aufwärts bewegter Moleküle, welche die Reaktion bedingen, wobei als wahre Kraft die Elastizität der gestoßenen Moleküle in Betracht kommt, die das Abprallen beim Stoß bedingt.

Fig. 3608.



In einfachster Weise kann man die Reaktion demonstrieren, wenn man einen Kautschukschlauch vertikal von dem Hahn einer Wasserleitung herabhängen läßt und in dessen Ende ein bogenförmig oder winkelartig gestaltetes Glasrohr einsetzt. Sowie das Wasser hindurchfließt, wird der Schlauch kräftig von der Vertikallinie abgelenkt. Steht große Wassermenge mit hohem Druck zu Gebote, so kann man gleichzeitig durch Anwendung eines weiten (Spritzen-) Schlauches zeigen; ein wie kräftiger Widerstand sich der Biegung des vom Wasser durchströmten Rohres entgegenstellt.

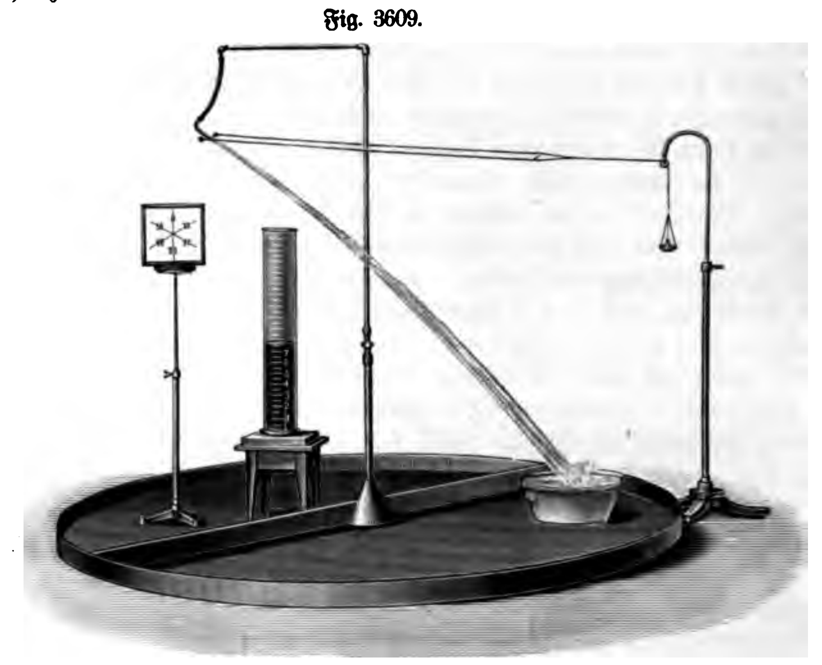
Ich benutze einen derartigen vertikal herabhängenden Schlauch mit horizontal gerichteter Ausströmungsspitze, verbunden mit einem Querstab, an welchem zwei über Rollen geführte, durch ein Gewicht belastete Schnüre angreifen (Fig. 3609).

---

[1]) Auch bei der Stoßwirkung des bewegten Wassers tritt zunächst Kompression des Wassers ein, so daß im Prinzip auch hier die Expansionskraft des gedrückten Wassers die treibende Kraft ist.

Das Gewicht ist so justiert, daß es dem aus der gemessenen Ausflußmenge pro Sekunde, sowie dem Querschnitt der Öffnung berechneten Reaktionsdruck gerade das Gleichgewicht hält. Es wird vor dem Ausfluß unterstützt, während des Ausflusses wird die Stütze weggenommen und schließlich gezeigt, daß, wenn außerdem das Gewicht entfernt wird, der Schlauch sich so stark rückwärts krümmt, daß der Strahl statt horizontal vertikal austritt.

Fig. 3609.



Die Größe des Reaktionsdruckes ergibt sich in gleicher Weise wie die Stoßkraft eines Wasserstrahles. Beispielsweise betrug die Ausflußmenge in 20 Sekunden 15 Liter, somit 0,75 Liter $= 0{,}75 . 10^{-3}$ cbm pro Sekunde. Der Querschnitt des Strahles war $80 . 10^{-6}$ qm, somit die Geschwindigkeit $\frac{0{,}75 . 10^{-3}}{80 . 10^{-6}}$ m/sec und die sekundliche Wassermasse $\frac{0{,}75}{9{,}81}$ Hyl.

Da die Geschwindigkeit in der Richtung des Strahles infolge der rechtwinkeligen Ablenkung desselben vollkommen aufgehoben wird, ist die Geschwindigkeitsänderung pro Sekunde der ganzen Geschwindigkeit gleich, die Stoßkraft also

$$\frac{0{,}75^2 . 10^{-3}}{80 . 10^{-6} . 9{,}81} = 0{,}550 \text{ kg},$$

wie auch durch den Versuch bestätigt wurde.

Will man nicht die Wasserleitung benutzen, so kann man ein mit Wasser gefülltes cylindrisches Gefäß, welches in der Nähe des Bodens eine verschließbare, seitliche Öffnung besitzt, an einer Schneide aufhängen, und durch angebrachte Gewichte den Schwerpunkt ganz nahe unter die Schneide bringen. Läßt man nun Wasser ausfließen, so stellt sich das Gefäß schief. Man kann auch nach Dr. Houdek ein Gefäß so aufhängen, daß es sich in labilem Gleichgewichte befindet, aber durch eine Hemmung, gegen die es sich leicht anlehnt, gehindert ist, nach der Seite der

Ausflußöffnung zu fallen. Zieht man dann den Stöpsel heraus, so kippt das Gefäß alsbald nach der anderen Seite um (Fig. 3610 [1]).

Sehr einfach ist die Vorrichtung Fig. 3611 (Lb, 1,75). Sie gestattet allerdings keine messenden Versuche.


Fig. 3610. Fig. 3611. Fig. 3612. Fig. 3613.

Einen vollkommeneren Apparat nach Hartl (Z. 9, 168, 1896) zeigt Fig. 3612 (K, 60). Konstanter Zufluß gibt konstante Ablenkung.

Da die Ablenkung von der Stromstärke abhängt, so kann ein solches Instrument so geeicht werden, daß es als Stromstärkemesser, d. h. zur Bestimmung der pro Sekunde ausfließenden Wassermenge zu gebrauchen ist.

651. Das Reaktionswasserrad. Will man nur zeigen, daß ein Rad durch Reaktion in Umdrehung versetzt werden kann, so kann man sich hierzu eines der im Handel in verschiedenster Ausführung zu beziehenden rotierenden Springbrunnenmundstücke (Fig. 3613 Lb, 25) bedienen [2]).

Zur wirklichen Messung des Effekts benutze ich ein größeres einfaches Reaktionsrad mit vier Speichen (Fig. 17, S. 26), welches durch einen oben angebrachten Schnurlauf mit einer Trommel verbunden wird, auf welche sich eine mit Gewicht belastete Schnur aufwickelt.

Beispielsweise betrug die Ausflußmenge bei einer der vier Röhren 10,5 Liter in 60 Sekunden, also, da der Strahlquerschnitt $78{,}5 \,.\, 10^{-6}$ qm war, die Geschwindig-

[1]) Zu beziehen von Dr. Houdek u. Hervert in Prag zu 5 fl. — [2]) E. Sonnenthal, Berlin C., Neue Promenade 6, liefert rotierende Rasensprenger zu 5 bis 24 Mk.

keit $v = \frac{10{,}5\,.\,10^{-3}}{60\,.\,78{,}5\cdot 10^{-6}}$, die sekundliche Wassermasse $\frac{4\,.\,10{,}5}{9{,}81}$ Hyl und das Kraftmoment bei ruhendem Rad, da die Länge der Speichen = 0,3 m war:

$$k\,.\,r = \frac{4\,.\,10{,}5}{9{,}81}\cdot\frac{10{,}5\,.\,0{,}3}{60\,.\,78{,}5\,.\,10^{-3}} = 2{,}86\,\mathrm{kg}\times\mathrm{m}.$$

Das an der Schnurtrommel gemessene Moment war natürlich nach dem Gesetz vom Wellrad den Radien des Vorgeleges entsprechend größer. Ließ man nun das Rad laufen, so verminderte sich die Kraft aus ähnlichen Gründen, wie beim laufenden Wasserrad (s. § 647, S. 1418).

Einen im Prinzip ähnlichen kleinen Apparat zeigt Fig. 3614. Es läuft dabei ein in den Boden des Cylinders A eingelöteter eiserner Stift auf einem mit einer eingebohrten Vertiefung versehenen und auf dem Boden des Gefäßes B angelöteten Stückchen Eisen oder Messing. Quer über die Öffnung des Cylinders A läuft der Steg cc, in welchen der Stift d geschraubt ist. Auf das Gefäß B ist der zweimal rechtwinkelig gebogene, zur Verstärkung an den Rändern

Fig. 3614.

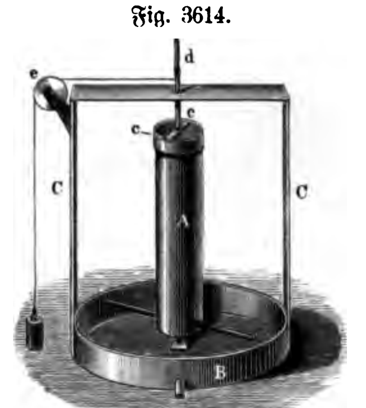


Fig. 3615.



umgelegte Blechstreifen CC gelötet, welcher dem Stift d als Führung dient und die leicht bewegliche Rolle e trägt. Man wickelt um den Stift d einen Faden, der über die Rolle geführt wird und eine Wagschale trägt, in der die Maschine ein gewisses Gewicht heben muß. Soll der Versuch länger fortgesetzt werden, so muß auch das Gefäß B eine Abzugsröhre haben; A kann man leicht stets voll erhalten. (E, 10 bis 20.) Eine andere Ausführung zeigt Fig. 3615 (K, 33).

Nach Anleitung von Fig. 3616 kann man ein Segnersches Wasserrad aus einem weiten Lampencylinder und einer engen Glasröhre, sowie aus zwei zweimal rechtwinkelig gebogenen Glasröhren leicht herstellen, nur muß der unten dreimal durchbohrte Kork wohl ausgesucht und noch durch Siegellacklösung gedichtet werden. (E, 6.)

Rousseau gestaltet das Reaktionsrad in Form zweier miteinander verbundener Heber, die den aufsteigenden Schenkel gemeinsam haben. Dadurch wird der Vorteil erzielt, daß das Wasser von unten hinauf steigt und nicht von oben eingeleitet oder eingegossen werden muß. (Fig. 3617 Lb, 8.)

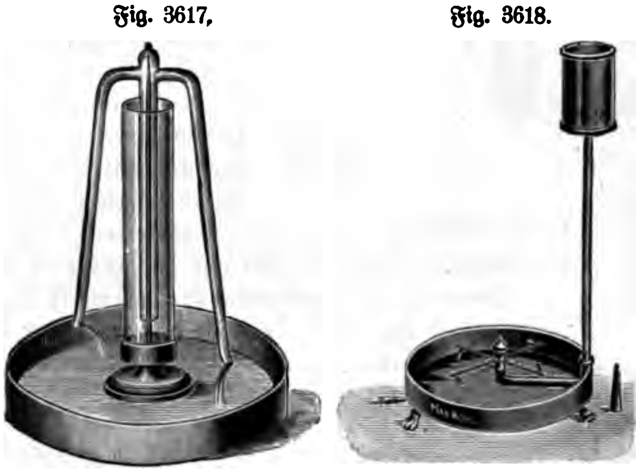
Althaus bringt das Reaktionsrad am aufwärts gebogenen Ende eines gewöhnlichen Hebers an. Der Apparat besteht ganz aus Glas. (A, 3.)

Auch Houdek läßt das Wasser des Segnerschen Wasserrades, ähnlich wie bei Turbinen, von unten eintreten. Die Zuleitung geschieht aus einem Reservoir am oberen Ende einer vertikal stehenden 1 m langen, $1^1/_2$ cm breiten Messingröhre, welche unten durch einen Hahn verschließbar ist [1]. (Fig. 3618 K, 20.)

Grimsehl (Z. 17, 323, 1904) benutzt das Reaktionsrad, um die Theorie der Kräftepaare zu erläutern. An derselben Röhre werden entgegengesetzte seitliche Öffnungen in verschiedenen Abständen von der Drehachse angebracht. Die beiden Reaktionskräfte bilden ein Kräftepaar, welches die Röhre um die Mitte zwischen den beiden Öffnungen zu drehen strebt.



Fig. 3616.


Fig. 3617. Fig. 3618.

652. Reaktionsmotor. Die Reaktionskraft kann auch zur Fortbewegung eines Schiffes benutzt werden, z. B. in der Art, daß man darin eine Kreiselpumpe oder sonstige Pumpe aufstellt, welche das Wasser am vorderen Ende auffaugt, am hinteren in kräftigem Stoß herausstößt. Infolge der Reaktion bewegt sich dann das Schiff entgegengesetzt, d. h. vorwärts.

653. Kolbenmotoren. Hierher gehört z. B. Schmidts Wassermotor (S. 102, Fig. 204, und S. 806, Fig. 2357). Ist p der Wasserdruck in Kilogrammen pro Quadratmeter, q die Kolbenfläche in Quadratmetern, s der Hub in Metern, so ist die Arbeit bei einem Hub, wenn die Kolbengeschwindigkeit vernachlässigt werden kann, $p.q.s = p.v$, wenn v das durchgeflossene Wasserquantum ist. Würde sich der Kolben mit derjenigen Geschwindigkeit begegnen, mit welcher das Wasser unter dem Drucke p ausströmt, so wäre die Arbeit $= 0$, die ganze Energie geht in Bewegungsenergie des Wassers über. Die Verhältnisse sind also ähnlich wie beim Wasserrade (s. § 647, S. 1418).

654. Hydraulische Kraftübertragung kann bei geringer Druckdifferenz und großer Stromstärke oder geringer Stromstärke und großer Druckdifferenz stattfinden. Große Druckdifferenz ermöglicht Anwendung engerer Röhren. Man kann hierbei auch auf die Verwendung des hydraulischen Akkumulators (§ 24, S. 128) hinweisen.

[1]) Zu beziehen von Dr. Houdek u. Hervert, Prag, zu 10 bis 12 fl.

655. Spritzloch. Bewegtes Wasser, welches auf krummliniger Bahn genötigt wird in die Höhe zu steigen, spritzt bis zu einer Höhe, welche sich nach den Fallgesetzen aus seiner Geschwindigkeit ergibt. Hierauf beruht die Brandung des Meeres, sowie eine andere an Meeresküsten beobachtete Erscheinung, daß bei bewegtem Meere aus Löchern in der Erde das Wasser anscheinend ohne Ursache in die Höhe spritzt, weil diese durch unterirdische Kanäle mit dem Meere in Verbindung stehen, z. B. auf Jona (Hebriden).

Eine technische Nutzanwendung ist de Calignys Pumpe ohne Kolben und Ventile. Am unteren Ende eines langen cylindrischen Rohres ist ein schwach konisch erweiterter Trichter angesetzt. Wird diese Röhre senkrecht in Wasser gestellt und dann abwechselnd schnell gehoben und dann langsam wieder gesenkt, so spritzt aus der oberen Öffnung Wasser heraus, welches durch eine geeignete Vorrichtung aufgefangen werden kann.


Fig. 3619.

Wird ein Heber (Fig. 3619), dessen kurzer Arm relativ weiteren Querschnitt besitzt, am längeren Arme zunächst mit dem Finger geschlossen, sodann in das Gefäß eingesetzt und nun der Finger entfernt, so steigt die Flüssigkeit in dem kürzeren Schenkel mit solcher Energie auf, daß sie von selbst den längeren Schenkel anfüllt und den Heber in Tätigkeit bringt[1]).

Wird eine gut zugestöpselte Flasche, welche Wein, Bier oder dergl. enthält, am unteren Ende mit einer Serviette umwickelt und damit wiederholt kräftig gegen eine Wand gestoßen, so wird der Stöpsel der Flasche durch die Flüssigkeit infolge der Trägheit der letzteren herausgetrieben.

656. Der Stoßheber. Das Wasser fließt nach einem bekannten und scheinbar zweifellos richtigen Satze stets bergab, d. h. von höher gelegenen zu tiefer gelegenen Stellen. Läßt man aber das fließende Wasser ein Wasserrad und dieses eine Pumpe treiben, so kann recht wohl ein Teil des Wassers dadurch auf größere Höhe gefördert werden, während allerdings die weitaus überwiegende Menge talabwärts strömt.

Noch einfacher wird dasselbe Ziel erreicht mittels des Stoßhebers. Derselbe ist einfach eine tunlichst lange und weite Rohrleitung, welche von einem Wasserreservoir ausgeht und in einen Heronsball einmündet und in letzterem durch ein Ventil abgesperrt wird, welches den Rücktritt des Wassers in die Rohrleitung verhindert. Unmittelbar vor dem Windkessel befindet sich eine weite seitliche Öffnung an dem Rohre, welche durch ein nach innen sich öffnendes Ventil verschlossen werden kann. Durch den Druck einer Feder wird dieses Ventil offen gehalten.

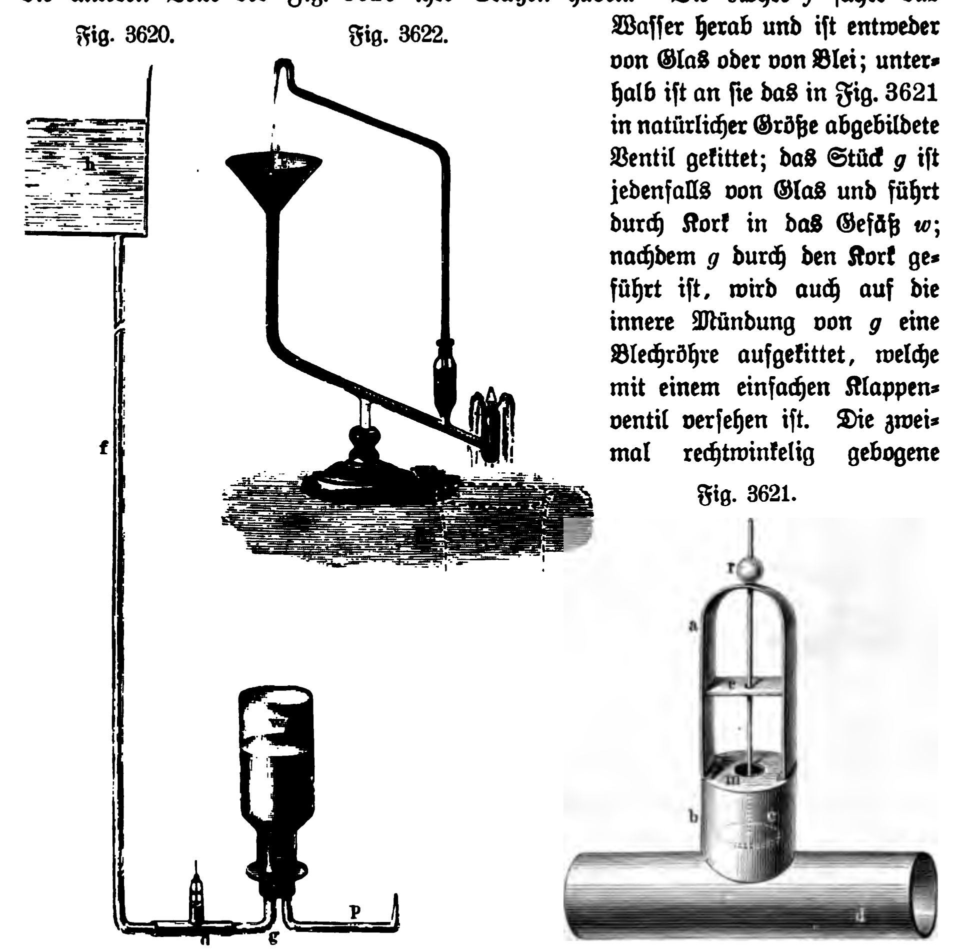
Läßt man nun aus dem Behälter Wasser in das Rohr einfließen, so strömt es zunächst durch das offen stehende Ventil aus, erreicht aber infolge der Weite der Öffnung bald so große Geschwindigkeit, daß es durch seine Stoßwirkung den Druck der Feder überwindet und das Ventil schließt. Plötzlich in seinem Laufe gehemmt, übt es nun einen so kräftigen Stoß auf das die Verbindung mit dem Windkessel unterbrechende Ventil aus, daß sich dieses öffnet, selbst dann, wenn in dem Windkessel schon beträchtlicher Überdruck vorhanden ist. Es strömt also ein Teil des Wassers in den Windkessel ein. Nun ist aber durch die vollbrachte Arbeits-

[1]) Eine Verbesserung dieser Vorrichtung beschreibt Rebenstorff, Z. 15, 90, 1902.

leistung die Energie des Wassers erschöpft, es kommt zur Ruhe, das Ventil schließt sich wieder und das äußere Ventil öffnet sich, da die Feder wieder ungestört wirken kann. Sodann beginnt das Spiel von neuem.

Mohr hat einen solchen Apparat im kleinen zusammengesetzt, der die Wirkung sehr gut zeigt und ohne viele Unkosten ausgeführt werden kann; er ist in den Fig. 3620 und 3621 abgebildet. Der Wasserbehälter *h* wird von einem Gestelle getragen, das unterhalb selbst wieder ein Wasserbehälter ist und auf dessen Boden die unteren Teile der Fig. 3620 ihre Stützen haben. Die Röhre *f* führt das Wasser herab und ist entweder von Glas oder von Blei; unterhalb ist an sie das in Fig. 3621 in natürlicher Größe abgebildete Ventil gekittet; das Stück *g* ist jedenfalls von Glas und führt durch Kork in das Gefäß *w*; nachdem *g* durch den Kork geführt ist, wird auch auf die innere Mündung von *g* eine Blechröhre aufgekittet, welche mit einem einfachen Klappenventil versehen ist. Die zweimal rechtwinkelig gebogene Glasröhre *p* dient als Springröhre. Das Stoßventil, Fig. 3621, besteht aus einem ebenen Metallplättchen, welches seine Führung durch ein Stäbchen in dem Bügel *a* hat und dessen Hub durch die mit einer Schraube versehene Kugel *r* reguliert werden kann; ebenso kann man sein Gewicht durch von der Kugel getragene, auf den Stiel geschobene Blechscheibchen regulieren. Die Röhre *d* und ihr Ansatz *b* sind von Blech gemacht. Man muß übrigens bei einem solchen Apparate die Geduld in Regulierung des Stoßventils nicht verlieren; denn nicht immer geht der Apparat sogleich, wenn er zusammengesetzt ist.

Fig. 3620. Fig. 3622. Fig. 3621.



Im Handel sind auch kleine, ganz aus Glas gefertigte Modelle des hydraulischen Widders (Fig. 3622 Lb, 6) zu haben. Dieselben können natürlich nur eine

schwache Wirkung äußern. Will man einigen Effekt erzielen, so sind weit mehr die großen, mehrere Meter langen zerlegbaren Apparate zu empfehlen [1].

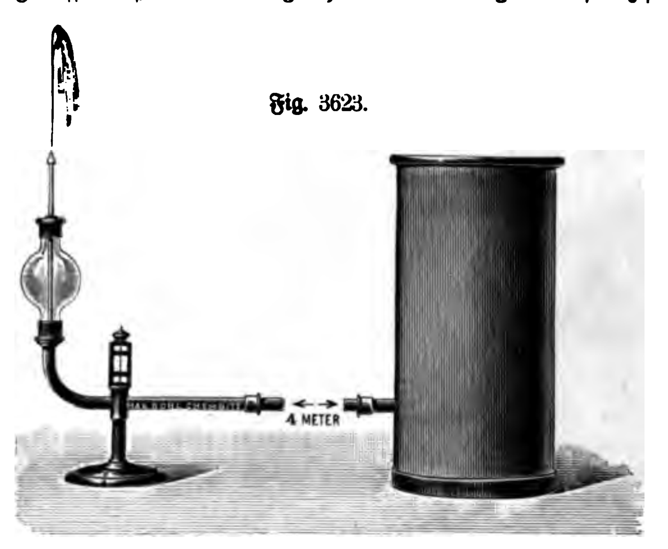
Gatchell (Dingl. Journ. 131, 86) bringt vor dem Steigventil eine Kammer an, welche durch eine elastische Membran von dem übrigen Körper des hydraulischen Widders geschieden ist. An diese Kammer schließt sich unten ein Saugrohr mit Saugventil an, so daß bei den Oscillationen der elastischen Membran in diese Kammer eine andere Flüssigkeit, in welche das Saugrohr eintaucht, eingesaugt und ausgetrieben wird, wie in dem Stiefel einer Saug- oder Druckpumpe, deren Kolben nur kleine Oscillationen macht. Zur Beförderung des prompten Nierderganges des Stoßventils bringt er darüber eine Feder an, welche das Ventil in der Ruhelage nicht berührt, wohl aber wenn es gehoben ist.

Fig. 3624.



Jagns Pulsierpumpe (Fig. 3625 und 3626) ist gewissermaßen eine umgekehrte Anwendung des Prinzips

Fig. 3623.



des Stoßhebers, insofern dabei die Energie des bewegten Wassers dazu benutzt wird, Luft aus einem Rezipienten auszupumpen. Wird nämlich ein Wasserstrahl durch Schließen eines Ventils plötzlich unterbrochen, so stellt sich hinter dem Ventil ein luftverdünnter Raum her.

Ein weicher Kautschukschlauch *kl* ist an das obere Ende eines vertikalen Glasrohres *ab* angebunden und im Winkel umgebogen, so daß er einknicken und dadurch die Öffnung verschließen kann. Ist dieses geschehen, so wird in der Röhre infolge der Fortbewegung des darin enthaltenen Wassers durch die vereinte Wirkung von Trägheit und Schwere ein luftleerer Raum erzeugt und durch ein seitliches Ansatzrohr *zgfe*, welches mit Bunsenschem Rückschlagventil versehen ist, tritt aus dem Rezipienten Luft ein. Nun öffnet sich der Schlauch wieder, läßt Wasser ein, welches die Luft fortnimmt, knickt wieder zusammen u. s. w.

---

[1]) Max Kohl in Chemnitz liefert einen größeren Apparat, Fig. 3623 (K, 66), bestehend aus großem Zinkgefäß mit 4 m langer Rohrleitung und gläsernem Windkessel, aus welchem das Wasser 4 m hoch empor getrieben wird, zu 60 Mk. Eine andere Form zeigt Fig. 3624 (E, 55). Sehr große hydraulische Widder für technische Zwecke liefern H. Breuer u. Co., Maschinenfabrik in Höchst a. M.

Das Bunsensche Ventil ist in Fig. 3626 für sich abgebildet. Über das geschlossene Ende (*e*, Fig. 3625) der Saugröhre ist eine Kappe aus dünnem, unvulkanisiertem Kautschukschlauch bei *hi* festgebunden. Sie ist seitlich bei *mn* aufgeschlitzt, so daß Luft, welche durch die Öffnung *g* austritt, entweichen kann, während dagegen nicht umgekehrt Luft von außen nach innen gelangen kann. Der Schlitz wird mittels eines scharfen Federmessers mit einem Schnitt hergestellt, indem man dabei den Schlauch auf ein passendes Holzstäbchen schiebt und bis in das Holz einschneidet. Diese Luftpumpe bedarf keiner hohen Wassersäule zum Betriebe. (M, 15.)

Eine von Linnemann ausgeführte, von dem Mechaniker Paul Böhme in Brünn zu beziehende Konstruktion der Pulsierpumpe zeigt Fig. 3627. Das Wasser tritt durch *a* ein und über *d* bei *b* aus. Infolge der Saugwirkung wird die Kautschukplatte x_1 gegen den Rand von *cc* angepreßt, so daß der Strom gehemmt wird, wobei die Kautschukplatte *x* den Stoß aufnimmt. Gleichzeitig klappt das Kautschukröhrchen *vvvv* nach innen zusammen und aus dem Mantel *mm* wird Luft eingesaugt. Alsbald hebt sich x_1 wieder, das Ventil sperrt die nach *mm* führenden Poren ab und das Wasser beginnt von neuem durch *b* abzufließen, bis die Stockung sich wiederholt.

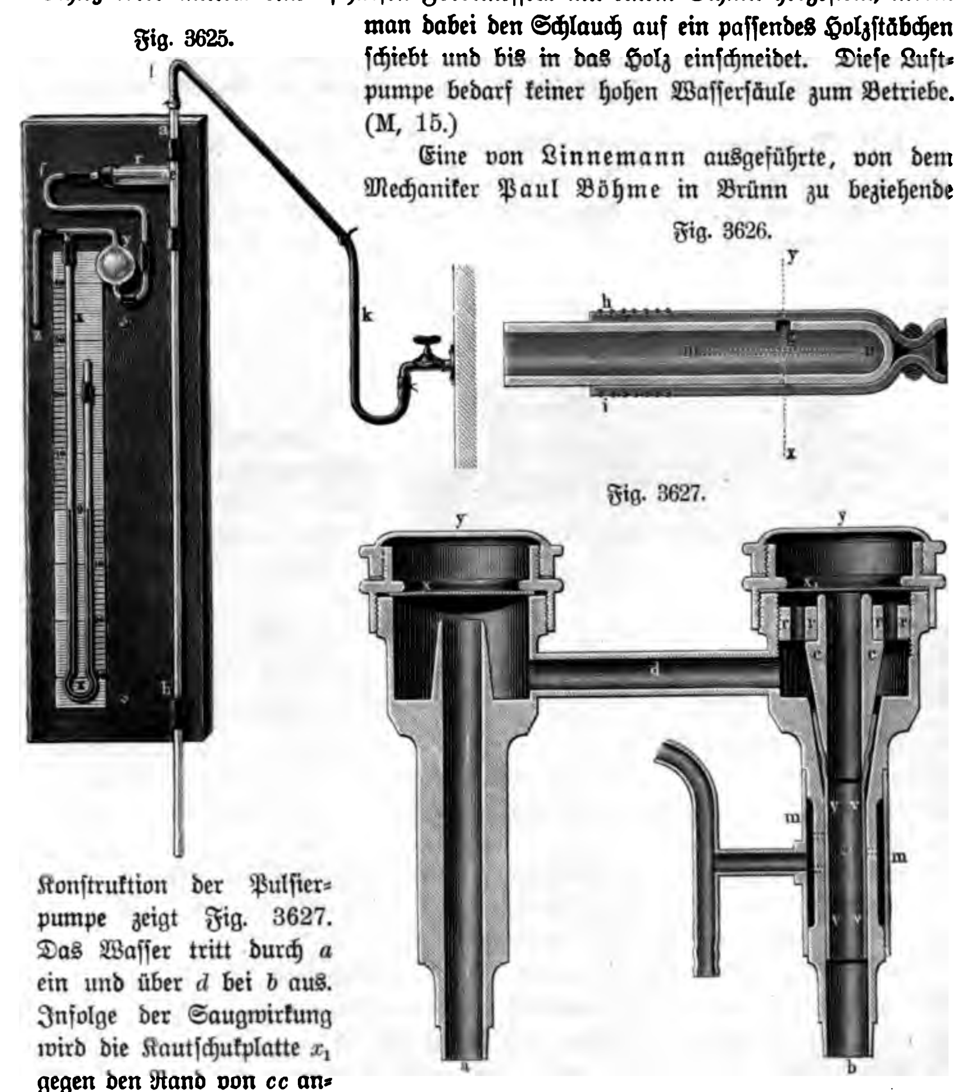


Fig. 3625.

Fig. 3626.

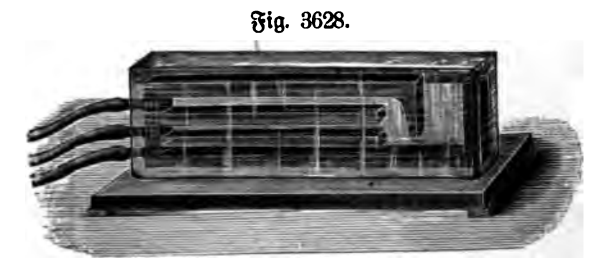
Fig. 3627.

657. **Wechselstrompumpen und -Motoren.** Bei der gewöhnlichen hydraulischen Kraftübertragung ist eine Gleichstrompumpe mit einem Gleichstrommotor verbunden.

Im Prinzip könnte man auch bei beiden die Ventil- oder Schiebersteuerung weglassen, wodurch eine Wechselstromkraftübertragung erhalten würde. Dabei tritt naturgemäß die Trägheit (Selbstinduktion) des in der Leitung enthaltenen Wassers sowohl durch den Widerstand, wie auch durch die Stoßwirkung störend hervor. Durch Einschaltung von Saug- und Druckwindkesseln (Kapazität) kann man diese Störungen mildern, ja ähnlich wie bei elektrischen Anlagen dauernden Wechselstrom erhalten, wenn die Verbindung zwischen Saug- und Druckwindkessel ganz unterbrochen ist. Die Stromstärke wird ein Maximum im Fall der Resonanz, d. h. wenn die Periode des Wechselstroms der Eigenschwingungsdauer des Systems entspricht.

658. Drehstrompumpen und -Motoren. Eine hydraulische Kraftübertragung ohne Zwischenfügung eines Akkumulators, S. 128, Fig. 249, ist unvollkommen, insofern die Kraft gleich Null wird, wenn sich die Kurbel auf dem toten Punkte befindet, über welchen sie durch die Trägheit des Schwungrades fortbewegt werden muß. Größere Gleichförmigkeit wird erzielt durch Anwendung von zwei Stromkreisen, welche derart miteinander verkettet sind, daß sich jeweils die eine Kurbel in der Stellung größten Drehmoments befindet, während die andere auf dem toten Punkte steht.

Fig. 3628.



Noch vollkommenere Wirkung erzielt man durch Verbindung von drei oder mehr Wechselstromkreisen. Ein für Projektion bestimmtes Modell eines Dreiphasenpumpwerks nach v. Würstenberger (Z. 9, 274, 1896) zeigt Fig. 3628 (S, 68). Der Motor läuft natürlich in gleichem Takt mit der Pumpe und heißt deshalb Synchronmotor. Fällt er aus dem Takt, so bleibt er stehen.

659. Die Kraftwirkungen in Flüssigkeiten pulsierender und oscillierender Körper. Bjerknes[1]) hat eine Reihe von Vorrichtungen angegeben, welche die Erscheinungen der elektrischen und magnetischen Attraktion und Repulsion zum Teil bis ins kleinste nachahmen und deshalb sehr interessant sind, weil sie zeigen, wie zwischen ganz verschiedenartigen Erscheinungen tiefgehende Analogie vorhanden sein kann, wobei allerdings nicht ausgeschlossen ist, daß vielleicht doch ein noch unerkannter Zusammenhang tatsächlich vorhanden ist[2]).

Pulsierende Körper (z. B. periodisch sich ausdehnende und kontrahierende Kautschukblasen) wirken analog elektrisch geladenen Körpern und zwar ziehen sie sich an, wenn die Phasen gleich sind und stoßen sich ab, wenn sie ungleich sind. Oscillierende Körper oder entgegengesetzt pulsierende Kugelpaare verhalten sich wie Magnete, ziehen sich an, stoßen sich ab und wirken drehend aufeinander ein, nach demselben Gesetze. Werden nicht oscillierende Körper in die Flüssigkeit eingebracht, so verhalten sie sich, je nachdem sie schwerer oder leichter als die umgebende Flüssig-

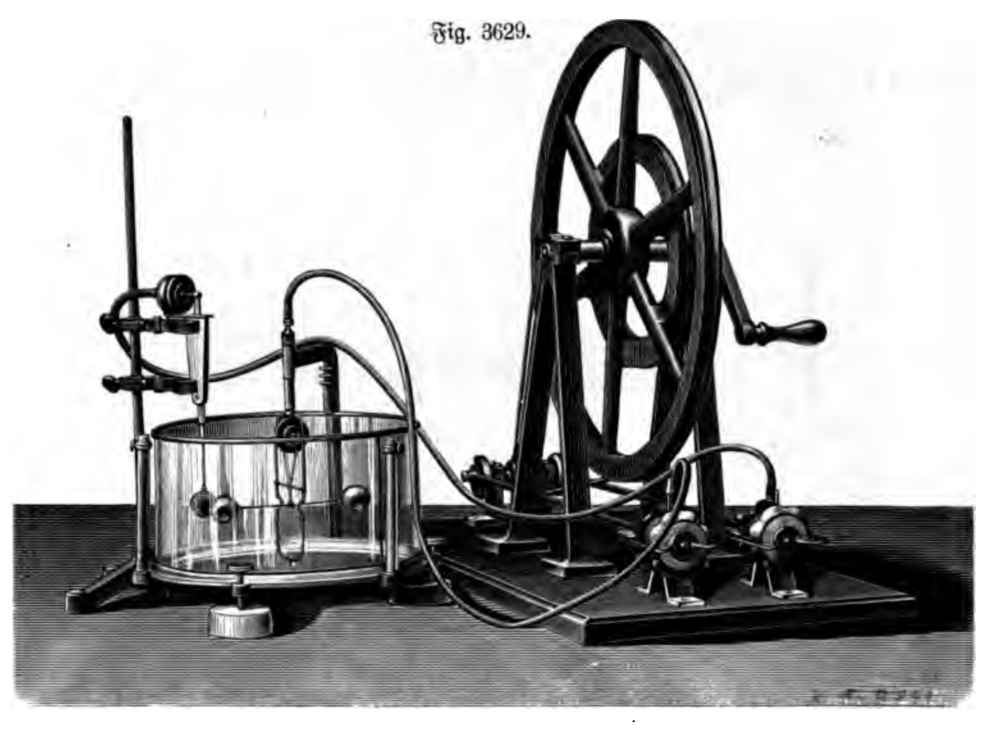
[1]) V. Bjerknes, Vorlesungen über hydrodynamische Fernkräfte, 2 Bände. Leipzig 1900 und 1902, Barth. — [2]) Die Apparate sind zu beziehen von dem Mechaniker J. L. Andersen in Christiania, Store Slotsgade 11. (Preis 400 bis 450 Mk.) Eine Beschreibung derselben findet man in Exners Repertorium 1883, S. 283. Über Wirbelbildung in reibungslosen Flüssigkeiten siehe V. Bjerknes, Beibl. 29, 340, 1905.

keit sind, wie paramagnetische oder diamagnetische Körper. Die Kraftlinien verlaufen in dem Vibrationsfelde ähnlich wie in der Nähe eines Magneten.

Um die Pulsationen hervorzurufen, dienen kleine, durch ein Schwungrad getriebene Blasebälge ohne Ventile, durch welche die Luft in den elastischen Hohlkörpern in rascher Folge regelmäßig verdichtet und verdünnt wird (Fig. 3629).

Von einem Unterschiede des Vorzeichens abgesehen, lassen sich die hydrodynamischen Fernwirkungen durch dieselben Formeln darstellen, welche man für die Abstandswirkungen zwischen Magneten oder zwischen elektrisch geladenen Körpern entwickelt hat. Die hydrodynamischen Fernwirkungen bilden mit anderen Worten

Fig. 3629.



ein negatives Bild oder ein Spiegelbild der elektrostatischen oder der magnetischen. Ist diese Lehre von den hydrodynamischen Fernwirkungen in den Unterricht eingeführt worden, so besitzt man ein vorzügliches Hilfsmittel, den Schülern die zeitliche Ausbreitung des elektromagnetischen Feldes durch Analogie verständlich zu machen.

660. Toter Raum. Kleine Partikelchen, welche langsam in einer Flüssigkeit heruntersinken, erregen hydrodynamische Kräfte infolge der Bildung von Wirbeln, welche sie hindern, eine in ihrem Wege liegende feste Wand zu berühren, so daß sich staubfreie, sogenannte tote Räume bilden[1]). Zuerst wurden solche von Liebreich erhalten, speziell bei Mischung von Chloralhydrat und wässeriger Sodalösung, welche sich durch Ausscheidung kleiner Chloroformtröpfchen trübt, sowie bei einem Gemisch von Jodsäure und schwefliger Säure, wo die Jodstärkereaktion für kurze Zeit nur im Zentrum von Kugeln oder vertikalen Röhren auftritt.

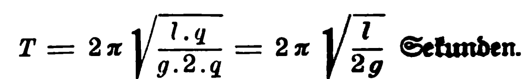
[1]) Siehe Quincke, Ann. d. Phys. 7, 93, 1902.

661. Wasserschwingungen. Füllt man eine weite U-förmige Röhre halb mit Wasser und erzeugt eine Niveaudifferenz, z. B. durch Saugen an einem Schenkel, und gibt nun das Wasser wieder frei, so kommt es in Schwingungen wie ein Pendel und zwar bestimmt sich die Schwingungsdauer genau nach derselben Formel, aus welcher oben (S. 1315) die Schwingungen eines Federpendels abgeleitet wurden, d. h. die Dauer der Schwingungen in Sekunden ist

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{f}}.$$

Einen zum Nachweis geeigneten Apparat zeigt Fig. 3630 (Lb, 15).

Ist l die Länge in Metern, q der Querschnitt der Wassersäule in Quadratmetern, so ist $m = \frac{l \cdot q}{g} \cdot 10^3$ Hyl und f (d. h. die Kraft beim Ausschlag 1 m, da dann die eine Wasserfläche 1 m über, die andere 1 m unter dem ursprünglichen Niveau steht) = dem Gewicht einer Wassersäule von 2 m Länge $= 2 \cdot q \cdot 10^3$ kg, demnach



$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l \cdot q}{g \cdot 2 \cdot q}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{2g}} \text{ Sekunden.}$$

Fig. 3630.

Beispielsweise war $l = 1{,}5$ m, also

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{1{,}5}{2 \cdot 9{,}81}} = 1{,}73 \text{ Sekunden.}$$

Die Schwingungen werden natürlich durch die innere Reibung rasch gedämpft, man könnte somit den Apparat auch benutzen zur **Bestimmung der Viskosität.**

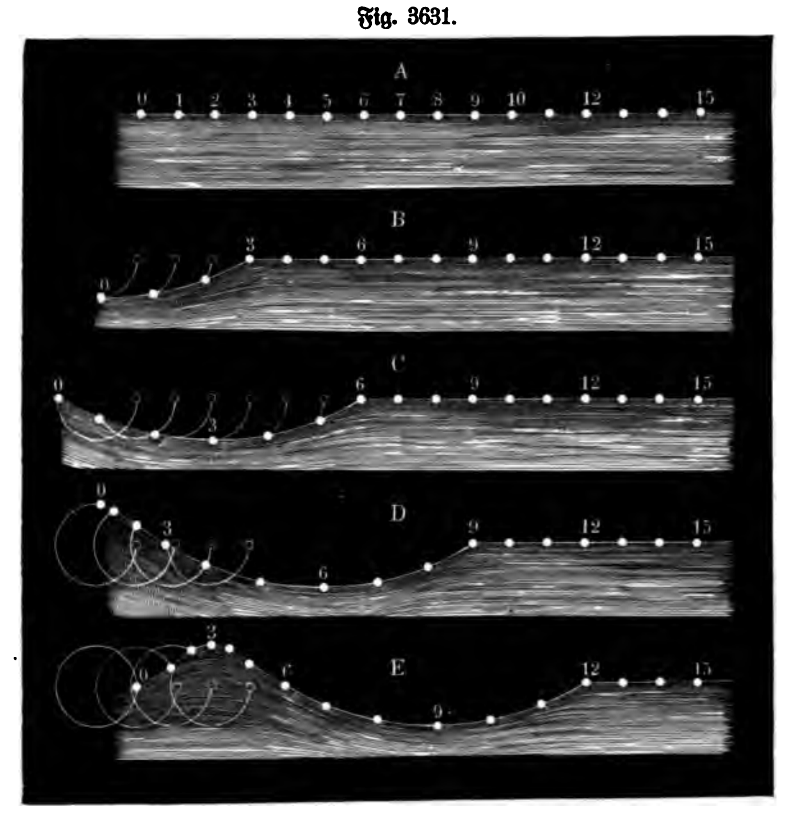
Dauernd kann man die Schwingungen erhalten, wenn man in die untere Biegung eine Wechselstrompumpe einsetzt und deren Frequenz so regelt, daß sie der Eigen-Schwingungsdauer des Wassers entspricht, daß, wie man sich ausdrückt, Resonanz stattfindet. Die Verhältnisse sind ganz ähnlich dem früher beschriebenen oscillierenden Schwungrad mit Feder, insofern hier an Stelle der Federkraft die Schwerkraft tritt. Die Schwingungsdauer erweist sich wesentlich abhängig von der Masse (Selbstinduktion) des Wassers und der Schwere (Kapazität). Versucht man die Pumpe mit anderer Frequenz zu betreiben, so macht sich ein um so größerer Widerstand (Impedanz) geltend, je größer die Abweichung von der Resonanz.

662. Wasser- und Quecksilberwellen. Wird ein Stein in das ruhende Wasser geworfen, so bilden sich kreisförmige Wellen, welche von einem Mittelpunkte (der Stelle, wo der Stein ins Wasser fiel) aus nach allen Richtungen sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit verbreiten, wenn nicht irgend eine störende Ursache wirkt. Die Wellen bestehen in abwechselnden Bergen und Tälern, welche ziemlich rasch einander folgen und welche in der Richtung von dem Mittelpunkte nach außen hin fortschreiten.

Während aber ein Wellenberg als ein sich immer mehr erweiternder Ring nach außen hin fortschreitet, nehmen nicht etwa auch die einzelnen Wasserteilchen an dieser fortschreitenden Bewegung Anteil. Denn wenn ein Stückchen Holz auf dem Wasser schwimmt, so sieht man, wie es abwechselnd gehoben wird und sich dann wieder senkt, während Wellenberge und Wellentäler gleichsam unter ihm wegziehen.

Haben sich einmal regelmäßige Wellen gebildet, so beschreiben die einzelnen Wasserteilchen an der Oberfläche während des Fortschreitens der Welle in sich zurückkehrende Kurven, welche im Falle der größten Regelmäßigkeit Kreise sind;

Fig. 3631.



nur in solchen Fällen, in welchen der dem Gipfel vorangehende Teil des Wellenberges dem folgenden nicht gleich ist, beschreiben die einzelnen Wasserteilchen unregelmäßige, nicht geschlossene Kurven.

Die Figuren 3631 A bis E, welche den Figuren 3399 1 bis 5 (S. 1328) entsprechen, stellen das Fortschreiten einer Wasserwelle bis zum 13. Teilchen dar.

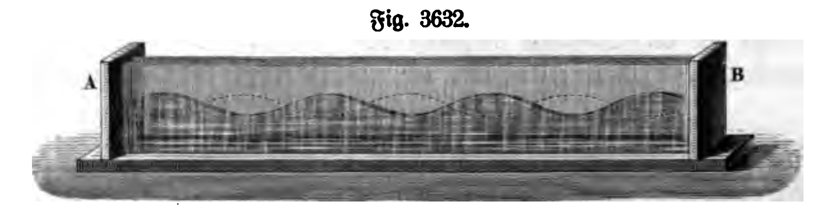
Die Wellen werden teils durch die Schwere, teils durch die Oberflächenspannung fortbewegt. Bedeutet λ die Wellenlänge, N die Schwingungszahl, so ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit u oder $N\lambda$ nach W. Thomson gegeben durch

$$u^2 = N^2\lambda^2 = g\left(\frac{\lambda}{2\pi} + \frac{\alpha}{s}\frac{2\pi}{\lambda}\right).$$

Man kann das Fortschreiten und die Zurückwerfung flüssiger Wellen sehr schön an dem von Wiedemann hierfür angegebenen Apparate, Fig. 3562 (S. 1401), zeigen.

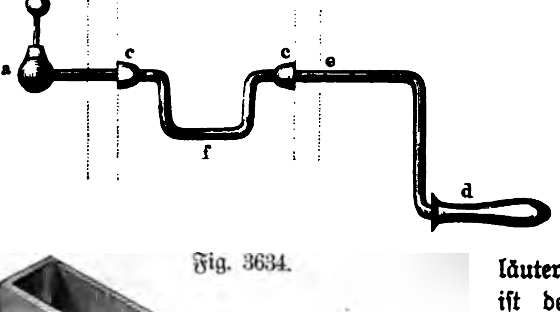
a a ist eine auf einem Brette befestigte Blechröhre, in welche oben kleine Blechröhrchen gelötet sind; in diese kittet man 5 mm weite, 20 bis 30 cm lange Glasröhren und füllt den Apparat mit gefärbtem Wasser, so daß dasselbe bis etwa zur halben Höhe der Glasröhren reicht. Man saugt nun an der mittelsten Röhre das Wasser etwas auf und läßt es rasch sinken. Die Welle schreitet durch alle Röhren fort und wird am Ende zurückgeworfen. Man kann selbst stehende Wellen erzeugen.

Fig. 3632.



Infolge der starken Reibung in den vertikalen Röhren ist die Wellenbewegung allerdings stark gedämpft. Erheblich weniger ist dies der Fall bei Webers Wellenrinne (Fig. 3632 Lb, 44), einem langen schmalen Trog, dessen lange Seiten aus Spiegelglas bestehen.

Fig. 3633.



Man kann hier auch die Abhängigkeit der Amplitude von der Tiefe unter der Wasseroberfläche nachweisen.

Fig. 3634.

663. Wellenmaschinen zur Erklärung der Wasserwellen. Sehr geeignet zur Erläuterung dieser Wellenerscheinungen ist der von Eisenlohr verbesserte Wheatstonesche Apparat. Fig. 3633 zeigt eine aus Draht gebogene Achse, welche einerseits in eine Schraube endet und daran den hölzernen Knopf *a* trägt, welcher seinerseits wieder an einem dünnen Drahte die etwas große Glasperle *b* hält. Am anderen Ende ist der Draht zur Kurbel gebogen, wobei zwei angelötete Knöpfe *c c* sein Verschieben in den Lagern verhindern. Solcher Drähte, etwa halb so dick und ohne die Knöpfe *c c* und die Kurbel *d*, also nur bis *e* reichend, befinden sich einige zwanzig in dem Kasten *A*, Fig. 3634, der für alle das gemeinschaftliche Lager bildet. Die Kurbelachse Fig. 3633 nimmt darunter die mittelste Stelle ein. Die langen Seitenwände des Kastens sind nach der punktierten Linie zusammengesetzt, so daß die Achsen alle vor der Verbindung der Teile eingelegt werden und die Knöpfe *a*, *b* alle auf einer Seite vorstehen. Die gebogenen Stücke *f*, Fig. 3633, aller dieser Achsen werden nun in die bewegliche Leiste *i*, Fig. 3634, gefaßt, welche hierfür aus zwei durch Schrauben verbundenen Hälften besteht, die die erforderlichen Einschnitte haben, so daß durch das

Drehen der Kurbel *d* alle Achsen gemeinschaftlich bewegt werden können. Die Knöpfe *a* werden auf ihren Schrauben so gedreht, daß die Glasperlen *b* die

Fig. 3635.

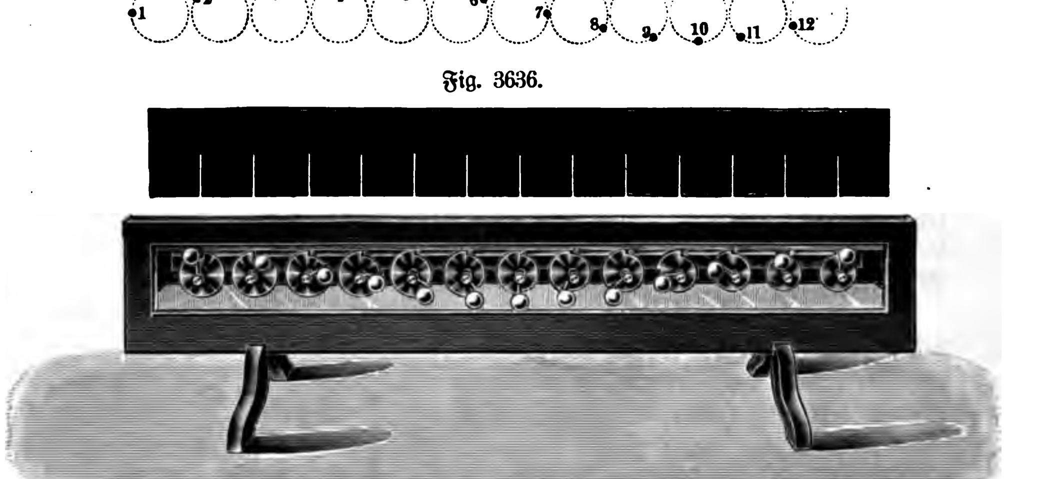
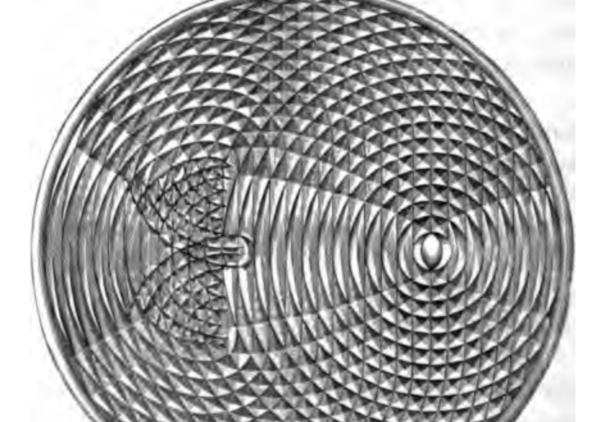


Fig. 3636.

Stellungen einnehmen, wie sie Fig. 3635 für zwölf aufeinander folgende zeigt. Wird nun die Kurbel *d* der mittleren Achse gedreht, so bilden die Glasperlen stets eine fortschreitende Wellenlinie. (W, 12.) Taylor (1884) hat den Apparat etwas geändert. Eine andere Form zeigt Fig. 3636 (Lb, 90).

Fig. 3637.



664. Interferenz. Man läßt intensives Licht von der Oberfläche von Quecksilber in einer weiten Schale auf einen Schirm reflektieren und erregt nun vorsichtig an einem Punkte der Quecksilberoberfläche Wellenbewegung. Man sieht deutlich die Reflexion an den Wänden und die Interferenz beim Zusammentreffen zweier Bewegungen. (Fig. 3637.) Bei Momentanbeleuchtung kommen auch die entstehenden Wellen auf dem Schirm sehr schön zur Anschauung.

Um die Wellen dauernd hervorzurufen, befestigt Lommel (1885) an den Zinken einer mit Resonanzkasten versehenen Stimmgabel in deren Verlängerung zwei Spitzen aus Eisendraht mit etwas Klebwachs und läßt diese, indem er die Stimmgabel vertikal abwärts gerichtet aufstellt, in eine flache Schale mit Quecksilber eintauchen. Die Stimmgabel wird nicht direkt, sondern durch Resonanz zum Tönen gebracht, um möglichst reine Schwingungen zu erhalten.

van Schaik (Z. 8, 250, 1895) demonstriert in ähnlicher Weise die Interferenz zweier Wellensysteme unter Benutzung einer pneumatisch bewegten Stahlfeder mit zwei Spitzen (Fig. 3638), wobei das projicierende Lichtbündel an einer Stelle größter Konzentration durch die relativ kleine Öffnung eines schwingenden Schirmes tritt, dessen Vibrationszeit ein wenig mehr als das Doppelte der Periode der erregten Wellen beträgt.

Wird eine flache elliptische Schale mit Quecksilber gefüllt und über dem einen Brennpunkt ein Trichter mit feiner Öffnung aufgestellt, aus welchem Quecksilber in die Schale herabtropft, so gibt jeder fallende Tropfen Anlaß zur Bildung fortschreitender Wellen, die von den Wänden wie von Hohlspiegeln reflektiert werden. (Fig. 3639 Lb, 27.) Diese an der Wand reflektierten Wellen interferieren mit den direkten Wellen und vereinigen sich im anderen Brennpunkte zu einer kleinen Erhöhung.

Es ist gut, wenn die Pipette über dem Brennpunkte auf irgend eine Weise befestigt ist, weil man sonst denselben beim Eintröpfeln leicht verfehlt.

Man macht sich das Gefäß, dessen Wände elliptisch gekrümmt sind, aus Holz oder Pappe

Fig. 3638.

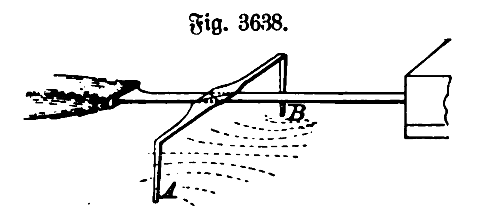




Fig. 3639.

von 10 bis 12 cm Länge. Bei Holz schneidet man eine elliptische Öffnung in ein Brettchen von hartem Holz, schleift sie mit Bimsstein aus und leimt einen Boden darauf.

Ein schöner Versuch ist folgender: Man beleuchtet die Quecksilberoberfläche durch elektrisches Licht (oder Sonnenlicht), welches etwa unter 45° auffällt und durch Vermittelung einer geeigneten Linse auf einem weißen Schirm ein Bild der Quecksilberfläche erzeugt. Beim Austritt aus der Laterne passiert das Licht eine Öffnung eines drehbaren Diaphragmas mit mehreren im Kreise stehenden Öffnungen. Steht letzteres still, so erscheinen auf dem Schirm nur die durch Interferenz erzeugten Hyperbeln, dreht man aber die Scheibe mit passender Geschwindigkeit, so werden auch die Wellen selbst sichtbar.

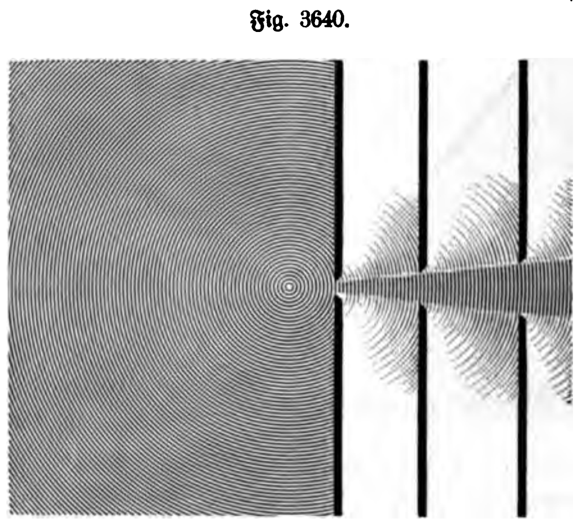
Das Interferenzoskop von Poppe (1868). Den Hauptteil bildet ein wasserdichter, viereckiger Trog, dessen Bodenfläche von einer Spiegelglasplatte gebildet wird. Er ist 22 cm lang, 18 cm breit und 5 cm tief und ruht auf vier Füßen, welche genügend hoch sind, um einen Planspiegel unter 45° Neigung gegen den Horizont darunter setzen zu können, welcher Sonnenlicht oder anderes intensives Licht von unten nach oben durch den Trog hindurch sendet. Die Wellen werden dadurch erregt, daß man, nachdem der Trog mit Wasser gefüllt und genau horizontal gestellt ist, eine Gabel aus Draht, welche durch ein Uhrwerk oder in anderer Weise in regelmäßiger auf- und abgehender schwingender Bewegung gehalten wird, mit ihren Zinken senkrecht in das Wasser eintauchen läßt. Es bilden sich dann um die beiden Zinken kreisförmig stehende Wellensysteme, welche miteinander interferieren und durch das von dem Spiegel reflektierte Licht auf einem über dem

Trog horizontal befestigten Schirm von feinem Briefpapier zur Anschauung gebracht werden. Wird die zweizinkige Gabel durch eine mit drei oder mehr Spitzen ersetzt, so entstehen entsprechend kompliziertere Wellensysteme. Noch kompliziertere Figuren erhält man, wenn die Gabel durch ein horizontales regelmäßiges Polygon aus Draht ersetzt wird oder durch eine polygonische oder anders geformte Scheibe, welche man 1 bis 1,5 mm unter die Wasseroberfläche eintauchen läßt.

Man kann den Apparat auch dazu verwenden, fortschreitende Wellen zur Anschauung zu bringen, wenn man das Licht, bevor es auf den Spiegel geleitet wird, durch eine rotierende Scheibe mit gleich weit abstehenden Schlitzen hindurchgehen läßt, oder wenn man das Bild durch eine solche stroboskopische Scheibe beobachtet.

Es wären hier ferner zu erwähnen die sogenannten Streckwellen, welche sich hinter einem Körper bilden, der auf der Oberfläche einer Flüssigkeit fortgezogen wird und z. B. sehr auffällig bei einem auf ruhigem Wasser fahrenden Schiff hervortreten, ferner die als Kielwasser bezeichneten unregelmäßigen Wellen.

Fig. 3640.



Backer (Phys. Zeitschr. 1, 557, 1900) benutzt einen Trog (72 cm × 55 cm × 7 cm) mit weiß angestrichenem, ebenem Boden. Er stellt dies Gefäß genau wagerecht und füllt es 1 cm hoch mit Wasser, das er mit Tinte so stark färbt, daß man den Boden bei ruhender Flüssigkeit noch deutlich sehen kann. Taucht man ein Becherglas von etwa 8 cm Durchmesser in den Trog, so bildet sich eine kreisförmige Welle, die mit der Geschwindigkeit 20 cm/sec nach dem Rande zu fortschreitet und dort zurückgeworfen wird. Man erzeugt, um Interferenzen zu vermeiden, bloß eine Welle oder höchstens einen Zug von zweien oder dreien.

Lassen wir Wasserwellen durch eine Öffnung in dem Damme des Teiches, in welchem sie erregt worden sind, in eine ausgedehnte Wassermasse außerhalb des Teiches sich ausbreiten, so zeigt sich, daß sie in geradliniger Richtung als Strahl aus der Öffnung heraustreten und also durch eine Reihe hintereinander befindlicher Öffnungen nur dann hindurchkommen können, wenn diese in gerader Linie hintereinander liegen (Fig. 3640).

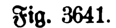
Diese Strahlen sind allerdings nicht völlig scharf gegen das nicht von Wellen durchzogene Medium abgegrenzt, sondern es zeigt sich, wie auch Fig. 3640 erkennen läßt, eine Umbiegung der Wellen um die Ränder der Öffnung, sogenannte Beugung, doch spielt dieselbe nur eine nebensächliche Rolle, da die Intensität der gebeugten Wellen verhältnismäßig gering ist.

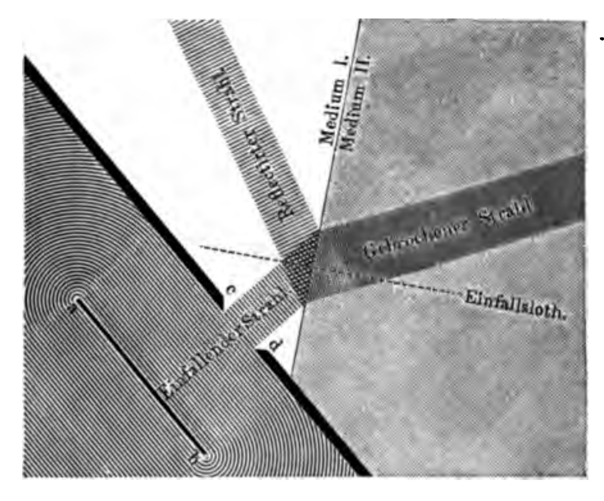
Wird statt eines einzelnen Steines eine größere Anzahl in gerader Reihe nebeneinander gleichzeitig in das Wasser eines Teiches geworfen, so verschmelzen die von denselben erzeugten Wellensysteme, indem sich die Kräfte nach dem Kräfte-

parallelogramm zu Resultierenden vereinigen, zu einem einzigen. Man nennt diesen Satz das Prinzip von Huygens.

Die Fig. 3641 zeigt z. B. das Wellensystem, welches beim Einwerfen eines Stabes *ab* entstehen würde, welcher als zusammengesetzt aus vielen kleinen, in einer Linie liegenden Stückchen betrachtet werden kann. Die Wellen sind hier größtenteils geradlinig und stehen in dem aus der Öffnung *cd* heraustretenden Strahle auf der Strahlrichtung senkrecht.

Trifft dieser Strahl auf die Grenze zweier verschiedener Medien, in Fig. 3641 als I und II bezeichnet, in welchen er sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzt, so wird er von seiner Richtung abgelenkt, und zwar dem Einfallslot (der Senkrechten auf der Grenze) genähert, falls die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Medium II, wie in der Figur angenommen, kleiner, davon abgebrochen, wenn sie größer ist als im Medium I.


Fig. 3641.



Das Medium II kann etwa ein mit Binsen oder Schilf bestandener Teil des Teiches sein oder ein Gebiet, in welchem die Wasserhöhe wesentlich niedriger ist, so daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlen geringer wird und eine Brechung eintritt wie bei den Versuchen S. 1374, Fig. 3502.

Außerdem wird ein Teil des Strahles reflektiert, und zwar so, daß der Einfallswinkel (der Winkel zwischen einfallendem Strahle und Einfallslot) gleich dem Reflexionswinkel (dem Winkel zwischen reflektiertem Strahle und Einfallslot) ist.

Bei dem erwähnten von Backer benutzten Trog bringt man geradlinige Wellen mit einem Holzklotz (50 cm × 7 cm) hervor. Stellt man die Hälfte eines cylindrischen Ringes an das eine Ende des Troges, so kann man damit alle Erscheinungen der Reflexion an einem Kreise zeigen. Brechungserscheinungen stellt man dar, indem man eine ebene Glasplatte, deren Dicke 1 mm kleiner ist als die Wassertiefe, in den Trog legt. Durch Versenken von dreieckigen und kreisförmigen Glasstücken zeigt man die Brechung in Prismen und Linsen. Zur Darstellung von Huygens Prinzip stellt man quer in den Trog eine Scheidewand mit einem Spalt in der Mitte. Erzeugt man eine Welle auf der einen Seite, so wird sie überall zurückgeworfen, außer an dem Spalt. Durch diesen tritt sie hindurch und verbreitet sich auf der anderen Seite als kreisförmige Welle, deren Mitte der Spalt ist. Auch Beugungserscheinungen kann man mit der Rinne einfach darstellen. Die Versuche lassen sich sehr schön an die Decke des Zimmers projicieren, wenn man die Bodenfläche des Gefäßes aus Glas herstellt und eine Lichtquelle (Glühlampe) darunter setzt.

Füllt man einen großen, flachen, quadratischen Trog (von schwarzer Papiermasse) mit Wasser und gibt ihm in diagonaler Richtung einen Stoß, so entstehen

ei sich rechtwinklig durchkreuzende Wellensysteme, gerade als ob man n Trog parallel zu den beiden Kantenrichtungen gestoßen hätte, ähnlich wie ein tahlstab von rechteckigem Querschnitt bei diagonalem Stoß parallel den beiden uerschnittsseiten schwingt.

Die Ausführung dieser Versuche scheint deshalb von besonderem Interesse, um später bei Zerlegung (Doppelbrechung) von Lichtschwingungen in anisotropen Medien darauf zurückgreifen zu können.

665. Kapillarwellen. Während bei der Bildung größerer Wellen hauptsächlich der hydrostatische Druck die treibende Kraft ist, kommt bei sehr kleinen fast allein die Oberflächenspannung in Betracht. Hierzu gehören insbesondere die oben besprochenen durch eine Stimmgabel erregten Wellen, welche deshalb auch dazu dienen können, die Oberflächenspannung zu bestimmen in Fällen, wo dies auf anderen Wegen nicht gut möglich ist, wie z. B. bei verflüssigten Gasen.

Man bringe zwei Spitzen, welche an die Enden einer Stimmgabel von bekannter Schwingungszahl N (Tonhöhe zwischen c und c_1 etwa) angeklebt sind, mit der Oberfläche der Flüssigkeit in Berührung und schlage die Stimmgabel an. Dann bilden sich zwischen den Spitzen stehende Wellen, deren λ (das Doppelte des Abstandes benachbarter Wellenberge) mit einem Zirkel und Maßstab in Millimeter ausgemessen wird. Dann ist

$$u^2 = N^2\lambda^2 = \alpha \cdot \frac{2\pi g}{s\lambda},$$

also $$\alpha = \frac{1}{2\pi} s \frac{\lambda^3 N^2}{g} = \frac{1}{61\,600} s\lambda^3 N^2 \frac{\text{mg-Gew.}^{1)}}{\text{mm}}.$$

Fig. 3642.

Beispielsweise findet sich so α in Gramm pro Centimeter für Blei 0,482; Quecksilber 0,400; Chlor 0,343; Schweflige Säure 0,340.

Ferner gehören hierher die Schwingungen eines Wasserstrahles, welche besonders deutlich hervortreten, wenn etwa die Schwingungen einer Stimmgabel auf die Ausströmungsspitze übertragen werden.



Fig. 3643.

Man kann die Schwingungen der Tropfen nach Fig. 3642 sichtbar machen, wenn man den Strahl mit intermittierendem Lichte beleuchtet oder durch eine rotierende Scheibe mit Schlitzen betrachtet, wie später bei Besprechung des Stroboskops erklärt wird.

Faraday bedeckte Klangplatten mit erhabenem Rande mit einer dünnen Wasserschicht und beobachtete die Schwingungen durch die Kräuselungen der Wasseroberfläche.

Melde (1860) erregt ein mit Wasser gefülltes Kelchglas durch Anstreichen mit dem Violinbogen zum Schwingen. Es entstehen an der Wandung regelmäßige Wirbelbewegungen, welche durch Aufstreuen von Lykopodium sichtbar gemacht werden. Benutzt man statt Wasser Alkohol, so springen von den Wänden aus Tröpfchen gegen die Mitte, welche eine sternförmige Figur auf der Oberfläche bilden. (Fig. 3643 K, 7,50.)

1) Mathiessen, Wied. Ann. 38, 118, 1889; Grunmach, Ann. d. Physik 3, 660, 1900.

Fig. 3644.



Wird ein Kelchglas mit Kalkmilch bestrichen und mit Sand bestreut, so verzeichnen die wandernden Sandkörnchen ihre Bahnen in dem Kalküberzug, welcher dadurch ein gestreiftes Aussehen erhält. Man erkennt, daß auf der Innenfläche des Glases bedeckte Knotenlinien entstehen, zu welchen die Sandkörnchen hinwandern, auf der Außenfläche unbedeckte, von welchen sie sich entfernen.

Decharme erregt Klangplatten elektromagnetisch, indem er am Rande auf der Unterseite ein Stückchen weiches Eisen befestigt und darunter einen Elektromagneten anbringt, so daß die Platte als magnetischer Hammer wirkt. Die Platten erhalten einen Rand aus Wachs und werden mit einer 1 bis 3 mm hohen Flüssigkeisschicht bedeckt, der noch Mennige oder ein anderes schweres Pulver beigemischt sein kann.

Läßt man eine elektromagnetisch erregte Klangplatte mit dem Rande senkrecht in Wasser eintauchen, so bilden sich an der Wasseroberfläche Stränge aus, deren Richtung davon abhängt, ob die Platte schnell oder langsam schwingt.

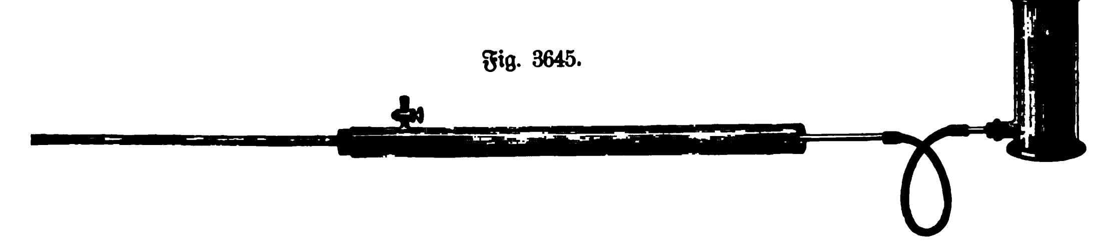
Wird an dem Ende eines geeigneten magnetischen Hammers eine Seifenblase angehängt, so teilt sich auch diese, ähnlich wie eine Klangplatte, in mehrere schwingende Abteilungen.

Die Strehlkeschen Tropfen (1837). Bringt man auf eine Klangscheibe Wassertropfen und bestäubt diese mit Lykopodium, so setzt dieses sich zunächst am Rande der Tropfen fest. Erregt man nun aber die Klangplatte, so geraten die Tropfen in Wirbelbewegung, welche die Staubkörnchen mitführt. Die Tropfen in der Nähe der Knotenlinie zeigen zwei entgegengesetzt rotierende Wirbel, deren Mittellinie senkrecht zur Knotenlinie steht. Quecksilbertropfen erhalten regelmäßige Einschnürungen und Erhöhungen.

666. Wellenberuhigung durch Öl. Wird bei dem eben beschriebenen Versuch mit der Klangscheibe, falls sich ein selbst aus der Entfernung sichtbarer Sprühregen bildet, die Oberfläche mit einer dünnen Ölschicht bedeckt, so verschwindet der Sprühregen. (Kraus, Z. 8, 214, 1895.)

667. Aufspritzen beim Eintropfen. Die eigentümlichen Vorgänge, welche sich abspielen beim Aufspritzen des Wassers, wenn ein Tropfen oder eine kleine Kugel hineinfällt, sind dargestellt in Fig. 3644 I bis VIII. Sie können durch Momentanphotographie oder durch die stroboskopische Methode sichtbar gemacht werden. Für den Unterricht dürfte sich die Projektion von Bildern mittels des Kinematographen empfehlen.

Fig. 3645.



668. Longitudinalschwingungen in Flüssigkeiten. Daß in Flüssigkeiten, speziell Wasser (ebenso wie in Luftsäulen), stehende Wellen sich bilden können, kann, wie A. Kundt (1874) gezeigt hat, durch Bildung von Staubfiguren nachgewiesen werden. Das Wasser muß zu diesem Zwecke durch anhaltendes Kochen möglichst

luftfrei gemacht werden. Als Staub dient fein zerteiltes Eisen, sogenanntes Ferrum alcoholisatum, welches gleichfalls zuvor längere Zeit in Wasser ausgekocht werden muß. Die Anordnung ist im übrigen die gleiche, wie bei der Erzeugung der Staubfiguren in Luft, welche S. 1485 f. näher beschrieben wird. Das Flüssigkeitsrohr nimmt am einen Ende den Stöpsel mit dem longitudinalen schwingenden Stab auf, am anderen einen verschiebbaren Kolben (Kautschukstopfen mit Glasrohr), dessen hohler Stiel mit einem Wasserbehälter in Verbindung steht (Fig. 3645). Man verschiebt diesen Kolben so weit, bis die Figuren sich am besten ausbilden. Diese Verschiebung ist möglich, da durch den Wasserbehälter der Überschuß oder Mangel an Wasser ausgeglichen werden kann.

Für Wasser ist die Elastizität $= \frac{1088 . g}{48{,}8 . 10^6}$ Dynen pro Quadratcentimeter, somit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{\frac{1000000 . 1088 . 981}{48{,}8}} = 1441 \text{ m/sec.}$$

Elftes Kapitel.

Aerodynamik.

669. Geschwindigkeitsmessung. Ähnlich der Bestimmung der Wassergeschwindigkeit in einem Flusse durch eingesetzte Schwimmer kann die Windgeschwindigkeit bestimmt werden durch Beobachtung der Bewegung leichter in der Luft schwebender Papierschnitzel, eines kleinen Luftballons (Versuchsballon) u. dergl. Man kann hierzu die Windbewegung hervorrufen durch einen Ventilator (elektrischer Tischventilator), ein großes akustisches Gebläse oder im einfachsten Falle durch Ausströmenlassen aus einem mit komprimierter Luft gefüllten Kessel. Ausflußmengen lassen sich mit der Gasuhr oder dem Glockengasometer messen.


Fig. 3646.

670. Ausströmen. Die Ausflußformel für die Flüssigkeiten gilt mit entsprechenden Abänderungen auch für Gase, wie man am einfachsten mittels eines Apparates wie Fig. 3646 (E, 33) nachweisen kann. Das in der unteren Kugel eingeschlossene Gas befindet sich unter dem Druck einer stehenden Wassersäule. Strömt beim Öffnen des Hahnes etwa 1 Liter Gas heraus, so sinkt dafür 1 Liter Wasser um die Druckhöhe herunter. Es geht somit potentielle Energie verloren, in Kilogrammetern gemessen gleich der Druckhöhe. Diese muß der vom Gase angenommenen Bewegungsenergie gleich sein. Dieselbe berechnet sich als Produkt des spezifischen Gewichtes mit dem halben Quadrate

der Ausflußgeschwindigkeit. Die Gleichsetzung der beiden Ausdrücke ergibt die Ausflußgeschwindigkeit und damit ebenso wie bei Flüssigkeiten das Ausflußquantum.

Ist h die Höhe der Wassersäule in Metern, W die Wassermenge in Kilogramm, G das Gewicht des ausgeströmten Gases und v die Geschwindigkeit in Meter-Sekunden, so ist

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{G}{g} \cdot v^2 = W \,.\, h,$$

oder, wenn d das spezifische Gewicht des Gases bezogen auf Wasser, da $G : W = d : 1$,

$$v = \sqrt{2g \frac{h}{d}} \text{ m pro Sekunde.}$$

Unter dem normalen Atmosphärendruck ist das spezifische Gewicht der Luft 0,001 29. Hat aber eine abgesperrte Luftmasse außer dem Druck der Atmosphäre, welcher bekanntlich einer Wassersäule von 10,33 m das Gleichgewicht hält, noch den Druck einer Wassersäule von h Metern zu tragen, so ist dem Mariotteschen Gesetz zufolge ihr spezifisches Gewicht

$$d = 0{,}001\,29 \frac{10{,}33 + h}{10{,}33},$$

mithin ergibt sich für die Ausströmungsgeschwindigkeit atmosphärischer Luft, welche außer dem normalen Atmosphärendruck noch den Druck einer Wassersäule von h Metern Höhe zu tragen hat,

$$v = \sqrt{2g \frac{h \,.\, 10{,}33}{0{,}001\,29\,(10{,}33 + h)}}.$$

Beispielsweise wird, wenn $h = 0{,}1$ m beträgt, $v = 38{,}79$ m, da ja $g = 9{,}8$ m ist.

Eine genaue Übereinstimmung der beobachteten und berechneten Werte ist allerdings unmöglich, insofern sich, wie früher gezeigt, ein Gas bei der Expansion abkühlt, somit dem Gay-Lussacschen Gesetze entsprechend, ein größeres spezifisches Gewicht annimmt als das, welches ursprünglich vorhanden war.

Zur Ausführung des Versuches benutze ich einen großen Glockengasometer mit Wasserbelastung, dessen Glocke oben mit einem weiten Ausströmungshahn versehen ist. Wird dieser geöffnet und gleichzeitig die Sekundenuhr in Tätigkeit gesetzt und damit die Zeit der Leerung beobachtet, so entspricht das Ausflußquantum, das sich aus den Dimensionen der Gasometerglocke berechnet, einigermaßen der eben erwähnten Formel. Insbesondere aber kann man zeigen, daß, wenn nun der Gasometer statt mit Luft mit Leuchtgas gefüllt wird, welches man mit einer Kompressionspumpe hineinpumpt und beim Ausströmen, um es zu zerstören, anzündet, die Ausströmungszeit eine sehr erheblich kleinere ist, da sich der Formel gemäß die Ausströmungsgeschwindigkeiten umgekehrt verhalten müssen wie die Quadratwurzeln aus den spezifischen Gewichten. Beim Einpumpen des Gases saugt man das Gas nicht direkt aus der Leitung, um keinen Unterdruck in dieser zu erzeugen, welcher Lufteinströmung und Explosionen veranlassen könnte, sondern aus einem damit verbundenen Kautschukbeutel und wartet vor jedem Kolbenzug, bis sich dieser gefüllt hat. Vor dem Versuch entnimmt man mittels eines umgekehrten Becherglases eine Probe und zündet diese an, um sich zu überzeugen, daß der Gasometer nicht etwa ein explosibles Gemisch von Gas und Luft enthält.

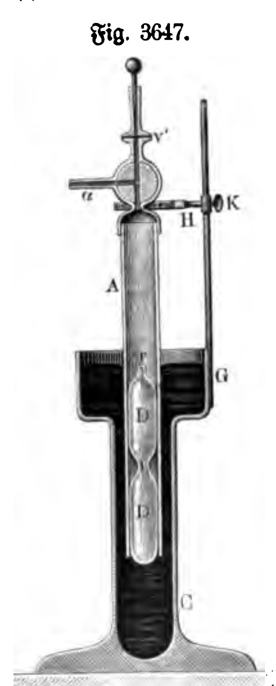
Beispielsweise beanspruchte die Leerung bei Füllung mit Luft 150 Sekunden. Hierauf wurde dieselbe Menge Leuchtgas eingefüllt. Die Entleerung dauerte

100 Sekunden. Somit ist, wenn man die Dichte der Luft = 1, die des Leuchtgases = x setzt: 100 : 150 = 1 : $\sqrt{x}$, also $x = 0{,}45$.

Das spezifische Gewicht der Kohlensäure ist 1,5=, das des Wasserstoffgases dagegen ist 0,069 mal so groß als das der atmosphärischen Luft. Die Ausströmungsgeschwindigkeit der Kohlensäure ist also $\frac{v}{\sqrt{1,5}} = 0{,}816\,v$, die des Wasserstoffgases aber $\frac{v}{\sqrt{0,069}} = 3{,}8 \cdot v$, wenn v die Ausströmungsgeschwindigkeit der atmosphärischen Luft unter gleichem Druck bezeichnet.

Zum Nachweis desselben Gesetzes in kleinerem Maßstabe dient der Effusionsapparat von Bunsen (Fig. 3647 Lb, 40), welcher eine Art gläserner Gasometer ist, bei welchem aber, da die Glocke in das Quecksilber hineingedrückt und festgestellt wird, der Druck sich während des Ausströmens ändert und das Ausflußquantum durch die Bewegung des gläsernen Schwimmers auf dem Quecksilber von einer Marke bis zu einer zweiten abgegrenzt wird.

Fig. 3647.



Da das spezifische Gewicht der Luft bekannt ist, kann man mittels des Apparates auf einfache Weise das spezifische Gewicht irgend eines anderen Gases bestimmen.

Einfacher könnte man zu gleichem Zwecke, falls es sich nur um Demonstration handelt, das Ausflußquantum mit einer Gasuhr bestimmen.

Bei Anwendung eines Druckluftkessels müßte die kinetische Energie des ausströmenden Gases entsprechen der zur Füllung des Kessels aufgewandten Kompressionsarbeit, die eventuell experimentell durch Einschaltung eines Transmissionsdynamometers (S. 1280) in die Transmission zum Kompressor bestimmt werden könnte. Ich benutze hierzu einen auf Rollen aufgestellten Kompressor der früher (S. 129) beschriebenen Art, welcher durch die Transmission im Auditorium (S. 86) betrieben wird. Auf dem Wege der Rechnung ist die Kompressionsarbeit nur umständlich zu finden, insofern man nur sagen kann, daß bei einer kleinen Änderung des Volumens um v cbm bei einem Druck von p kg pro 1 qm die aufgewandte Arbeit $p \times v$ kgm beträgt und somit die ganze Kompressionsarbeit durch Summation aller dieser Beträge bestimmt werden muß. Konstante Temperatur vorausgesetzt findet man so, daß, wenn p_0 der anfängliche und p_1 der schließliche Druck war und v_1 das Volumen des Kessels, die Kompressionsarbeit beträgt:

$$A = p_1 v_1 . l \frac{p_1}{p_0} = p_1 v_1 . 2{,}3026 \log \frac{p_1}{p_0} .$$

Beträgt beispielsweise das Volumen des Kessels 0,25 cbm, der Anfangsdruck 10000 kg pro Quadratmeter, d. h. 1 Atm., der Enddruck 10 Atm., so wäre die Kompressionsarbeit $0{,}6 . 10^5$ kgm. Bei Anfangsdrucken von 0,1, 0,01, 0,001, 0,0001 . . . Atm. wäre die Kompressionsarbeit das 2=, 3=, 4=, 5= . . . fache des genannten Wertes.

Scheinbar kann man von einer in dem Druckkessel durch die Kompressionsarbeit aufgespeicherten Energie sprechen, ebenso wie von der in einem Wasserbehälter

oder einer Talsperre aufgespeicherten Energie, man hat auch dafür den Namen Volumenergie eingeführt. Indes hängt dieselbe, wie gezeigt, wesentlich ab von dem Anfangszustande des Gases und wird unendlich groß für ein anfänglich unendlich verdünntes Gas. Wie sich die Energie wirklich aufspeichert, kann erst in dem Kapitel Thermodynamik besprochen werden.

671. **Manometer—Anemometer.** Faßt man eine Flasche mit der rechten Hand, verschließt die Öffnung derselben mit dem Daumen der linken, so daß nur eine enge Öffnung bleibt und bläst man nun gegen diese und verschließt während dessen die Öffnung ganz, so enthält die Flasche so viel komprimierte Luft, daß man damit eine Kerzenflamme ausblasen kann.

Dieser Versuch erinnert an die Geschwindigkeitsbestimmung von Wasser mit der Pitotschen Röhre. Man kann in der Tat ein einfaches Anemometer (Windmesser) in der Weise erhalten, daß man die Luft gegen einen Trichter strömen läßt, welcher durch einen Schlauch mit einem Manometer verbunden ist. Die Skala desselben läßt sich so aichen, daß sie direkt die Windgeschwindigkeit gibt.

672. **Fortleitung der Gase in Röhren.** Um die hierher gehörigen Gesetze zu zeigen, bedient man sich sehr bequem des Leuchtgases. Man füllt das Gasometer damit an, setzt mittels eines Stückchens einer Kautschukröhre ein sehr enges, 3 dm langes Eisenrohr daran, öffnet die Hähne, zündet das Gas unmittelbar an der Röhre an und beobachtet die Zeit, welche zum Verbrennen eines gewissen Quantums erforderlich ist; sodann setzt man ein vier- oder neunmal längeres Rohr von gleichem Kaliber an, wobei man die Länge der Röhren im Gasometer nicht vernachlässigen darf, und macht die gleiche Beobachtung. Schon die Flamme gibt hier einen ganz augenfälligen Maßstab für die Verminderung der Ausflußmenge, wenn der Druck im Gasometer nicht über 1 cm Wasser beträgt. Eventuell kann man auf Eisenrohr Manometer, wie Fig. 2669, S. 960, aufschrauben, analog dem Versuche mit der Röhre Fig. 3562, S. 1401.

Das Gasometer wird mit Leuchtgas gefüllt, indem man, wenn es wie Fig. 2649, S. 951 beschaffen ist, irgend eine Brennöffnung mit der Einströmungsröhre des Gasometers verbindet; durch Aufziehen der Glocke kann man das Einströmen des Gases beschleunigen. Zweckmäßiger ist Einpumpen (vergl. S. 1445). Ein Manometer, wie Fig. 2669, S. 960, aber nur doppelt so groß als die Zeichnung, wird auf die Glocke geschraubt und beim Ausströmen der Gase das erforderliche Gewicht auf die Glocke gelegt; Wasserbelastung ist vorzuziehen (vergl. S. 132).

673. **Windleitungen mit Erweiterungen.** Infolge von Wirbelbildungen und Druckänderungen bei Erweiterungen und Verengungen an Windleitungen wird durch solche die Durchflußgeschwindigkeit eines Gases wesentlich beeinträchtigt; insbesondere werden Schwankungen derselben gedämpft. Beispiele sind: das Verhindern des Zuckens der Gasflammen beim Betriebe eines Gasmotors durch eingeschaltete Kautschukbeutel, die Anwendung eines nicht dicht schließenden Kolbens mit Rillen bei der Luftpumpe von Deleuil (S. 135, Fig. 264) u. dgl.

674. **Kapillarröhren.** Zum Nachweis des Poiseuilleschen Gesetzes kann man dieselben Apparate verwenden wie bei Flüssigkeiten. Das Durchflußquantum

kann eventuell an einer eingeschalteten Gasuhr abgelesen werden. Man findet auf diesem Wege den Reibungskoeffizienten in CGS-Einheiten für

	Luft	Wasserstoff	Kohlensäure
bei 0°	0,000 171 4	0,000 086 4	0,000 143 1
bei 180°	0,000 240 6	0,000 123 2	0,000 215 4
bei 1200°	0,000 548 1	0,000 301 9	—

675. **Innere Reibung der Gase.** Bei 15° ergibt sich der Reibungskoeffizient in Gramm pro Quadratcentimeter bei der Geschwindigkeitsdifferenz von 1 cm/sec pro Centimeter für:

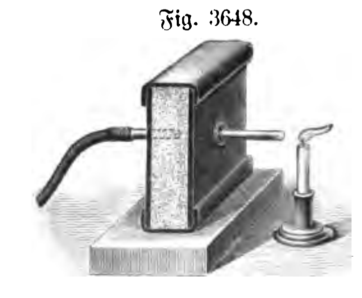
Wasserstoff	Kohlensäure	Kohlenoxyd	Stickstoff	Sauerstoff
$9{,}4 \cdot 10^{-8}$	$15{,}5 \cdot 10^{-8}$	$17{,}2 \cdot 10^{-8}$	$18{,}1 \cdot 10^{-8}$	$20{,}7 \cdot 10^{-8}$

Von besonderem Interesse ist der Apparat von Röntgen (Fig. 3570, S. 1405), welcher ermöglicht, die starke Zunahme der inneren Reibung mit steigender Temperatur zu zeigen. Ich verwende denselben mit der Abänderung, daß die Luft durch eine Wasserluftpumpe durch die Kapillarröhren hindurchgesaugt und der Druck an ihren Enden durch angesetzte Steigröhren, welche in Gläser mit gefärbtem Wasser eintauchen, bestimmt wird.

Der große Widerstand, der sich der Bewegung der Luft in engen Zwischenräumen entgegenstellt, wird verwertet bei den sog. Pumpendämpfungen, bestehend aus einem geschlossenen Cylinder, in welchem sich ein nahezu, aber nicht vollkommen dicht schließender Kolben bewegt. (Vergl. Flüssigkeitsdämpfung, S. 1406.) Hierher gehören z. B. manche selbsttätige Türschließer. Ein oscillierendes Schwungrad mit Pumpe kann zu messenden Versuchen dienen.

Legt man den Deckel eines Zigarrenkistchens so auf einen Tisch, daß derselbe zur Hälfte über die Kante vorragt, bedeckt die aufliegende Brett-Hälfte mit einer etwas großen Zeitung und schlägt nun mit geballter Faust kräftig von oben auf die hervorragende Hälfte, so bricht diese ab, ohne daß die Zeitung gehoben oder zerrissen wird. Infolge der Reibung kann nämlich durch den kapillaren Raum zwischen Tischfläche und Papier während der Dauer des Stoßes wenig Luft eindringen, so daß fast der volle Luftdruck auf die Papierfläche zur Geltung kommt.

Fig. 3648.



In gleicher Weise macht sich der Luftwiderstand geltend beim Gebrauch der Adhäsionsplatten (S. 774). Die Adhäsion ist zum Teil nur eine scheinbare, eine Folge des Luftdrucks, da die Luft nicht zwischen die Platten eindringen kann.

Daß nichtsdestoweniger durch sehr enge Kanäle eine große Menge Luft durchströmen kann, falls die Anzahl der Kanäle sehr groß ist, zeigt der Versuch von Pettenkofer, daß man bei der in Fig. 3648 dargestellten Anordnung imstande ist durch einen Backstein hindurch ein Licht auszublasen. Gleiches gilt für Holz. Der Versuch ist von besonderem Interesse, insofern er zeigt, daß durch die Mauern eines Gebäudes hindurch ein beständiger Luftwechsel stattfindet, falls dieselben nicht etwa mit Ölfarbe angestrichen sind, und daß in solchem Falle das häufige Öffnen der Fenster unnötig

ist, im Gegenteil, besonders im Winter, infolge der eintretenden Abkühlung der Wände diese stete Luftzirkulation stört.

Der Unterschied der Gasreibung bei verschiedenen Gasen kann besonders dadurch veranschaulicht werden, daß man einen vertikalen Wasserstoffstrahl durch ein horizontales Fließpapier hindurchgehen läßt und darüber anzündet. Es wird durch das Papier kaum merklich aufgehalten. Anders ein Strahl von Acetylen.

Rebenstorff (Z. 8, 317, 1895) zeigt das Durchdringen von Wasserstoff durch Schreibpapier, indem er über dasselbe eine Rauchschicht bringt. Ein Glasgefäß mit ebenem Rande wird auf ein mehrfach zusammengelegtes trockenes Tuch gestellt, aus einem weiten Schlauch langsam eine 2 bis 3 cm hohe Schicht Rauch auf den Boden gebracht, das Glas mit einem Blatt Schreibpapier, darüber mit einem Brett bedeckt und nun ganz langsam umgekehrt mit der Vorsicht, daß die Hände nur das Tuch, nicht das Glas berühren, wobei sich der Rauch nun über das Papier lagert, nun Glas und Papier von dem Brett auf einen Blechring geschoben und sodann mit diesem über eine Spitze, aus welcher Wasserstoff ausströmt. Sofort erhebt sich über der betreffenden Stelle ein dichter Rauchstrom und in wenig Augenblicken ist die ganze am Boden lagernde Rauchmasse zum Aufströmen gebracht.

Für die Bewegung der Luft in porösen Körpern, in welchen sie keine bemerkliche Bewegungsenergie annehmen kann, gilt ebenso wie für die Bewegung des Wassers in porösem Erdreich das Ohmsche Gesetz; sie kann also ebenfalls durch die schon früher gezeigten Strom- und Niveaulinientafeln veranschaulicht werden, auch gelten für Stromverzweigungen die Kirchhoffschen Gesetze.

Fig. 3649.

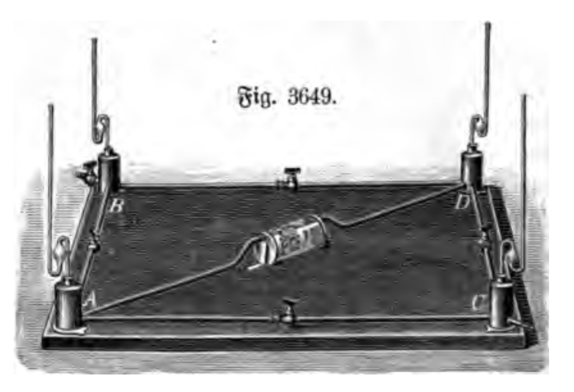
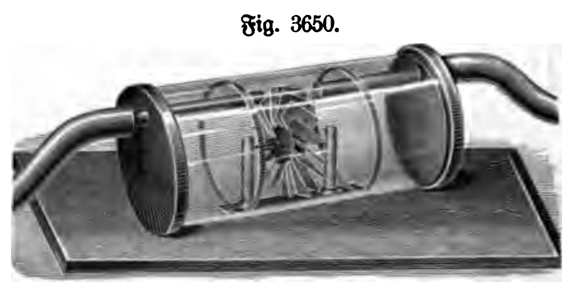


Fig. 3650.



676. Stromverzweigung. Um die Stromstärke in einzelnen Zweigen einer Leitung nachzuweisen, müßte man in dieselben Gasuhren einschalten. Zur Demonstration kann man aber auch mit einfacheren Mitteln auskommen.

Elie (1882) bildet z. B. eine Art Wheatstonescher Brücke aus Röhren. Das Galvanometer wird ersetzt durch eine Flasche mit zwei sich gegenüberstehenden Ansatzröhren, zwischen welchen eine Lamelle aus Blattgold, die an dem Stöpsel der Flasche befestigt ist, herabhängt. Je nach der Richtung in welcher dieser Blattgoldstreifen abgelenkt wird, kann man beurteilen, ob der Luftstrom die Brücke in der einen oder anderen Richtung durchfließt und kann durch Verlängern oder Verkürzen der Röhren oder Verengung des Querschnittes (Quetschhähne) bewirken, daß der Brückenstrom verschwindet.

Noak (1888) fügt vier enge Messingröhren, wie Fig. 3649 zeigt, unter Zwischenfügung von vier Blechgefäßen auf einem Brett zu einem Quadrat $ABCD$ zusammen und verbindet sie durch eine fünfte diagonale Röhre AD. In die letztere ist die in Fig. 3650 für sich dargestellte Windmühle eingeschaltet. Der die Mühle treibende Luftstrom tritt durch den Hahn bei B ein und bei C aus. Je nach dem Verhältnis der durch Drehen der Hähne in den Zweigleitungen erzeugten Widerstände dreht sich das Windrädchen im einen oder anderen Sinne, oder gar nicht[1].

677. Lufttreibung. Daß sich hinter einem Hindernis die Luft ebenfalls bewegt, kann nach Goy (1883) so gezeigt werden, daß man hinter eine Weinflasche eine brennende Kerze stellt und aus 20 bis 30 cm Entfernung auf die Flasche bläst. Das Licht löscht ebenso aus, als ob die Flasche nicht vorhanden wäre. Die Luftstromlinien biegen sich also um die Flasche herum, die Luft gleitet an derselben.

Wäre keine Reibung vorhanden, so würde keine Arbeit verbraucht werden, ebenso wenig als bei Bewegung eines Eisenbahnzuges auf einer Kurve oder bei Bewegung eines Kometen um die Sonne. (Vgl. § 531, S. 1264).

Das Mitreißen der Luft durch einen bewegten Körper kann man an einem Kreisel sehen, dem man ein leicht bewegliches Flügelrädchen nähert, oder einfacher eine Flamme.

Looser benutzt die Manometer seines Doppelthermoskops (S. 1054) unter Beiziehung der durch Luftströme bedingten Verdunstungskälte.

„Man stelle einen schwarz polierten Rezeptor, der mit dem Manometer verbunden ist, auf eine Röhre des Fußbrettes und drücke ein mit Wasser benetztes Stück Filtrierpapier (von etwa 80 mm Durchmesser) auf die polierte Fläche. Dicht davor stellt man einen auf der Schwungmaschine befestigten Pappcylinder (eine runde Pappschachtel wird mit einem in der Mitte des Bodens angebrachten Loche über die Schraube der Schwungmaschine gesetzt und festgeschraubt). Sobald die Flüssigkeitssäule nicht mehr sinkt, stellt man sie, durch momentanes Öffnen des Hahnes, auf Null und setzt den Pappcylinder in schnelle Rotation — sofort zeigt das Manometer eine weitere Abkühlung an."

Fig. 3651.

„Hält man an die entgegengesetzte Seite des rotierenden Cylinders ein brennendes Streichholz oder eine Kerzenflamme, so steigt das Manometer (im mittleren Schenkel) sofort. Die warme Luft wird mindestens eine halbe Umdrehung weit mitgeführt."

Es mag hier auch hingewiesen werden auf die Seitenabweichung der Geschosse, die durch deren Rotation bedingt ist und zwar dadurch, daß deren Längsachse schief steht zur Flugbahn, also eine Luftverdichtung vor der Mantelfläche des Geschosses entsteht, auf welcher dieses infolge der stärkeren Reibung wie auf einer dichteren Unterlage zur Seite rollt.

Zur Demonstration, daß auch im sog. Vakuum noch beträchtliche Reibung vorhanden ist, bedient sich Kundt eines Radiometers mit scheibenförmigem Rad, welchem in einigem Abstand eine zweite drehbare Scheibe, aber ohne Flügel, parallel und koaxial gegenübersteht. Letztere kommt allmählich in gleichsinnige Drehung, wie die erstere. Um die Drehung sichtbar zu machen,

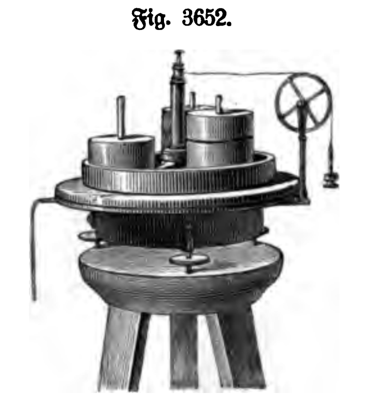
[1]) Der Apparat ist zu beziehen von Liebrichs Nachfolger in Gießen zu 40 Mk.

die Scheibe mit geeigneten Marken versehen. Der Versuch eignet sich gut zur Projektion[1]).

Innerhalb gewisser Grenzen ist die Gasreibung unabhängig vom Druck, dagegen wächst sie beträchtlich mit der Temperatur, wie sich auch aus der im folgenden Kapitel zu besprechenden kinetischen Gastheorie ergibt. Eine Nutzanwendung hiervon ist das Viskositätspyrometer von Job (Z. 15, 166, 1902). Derselbe Gasstrom, z. B. elektrolytisch entwickelter Wasserstoff, wird nach einander durch eine kalte Kapillare und eine auf die zu messende Temperatur erhitzte geleitet, wobei im zweiten Fall infolge der vergrößerten Reibung der an einem Manometer abgelesene Druck größer ist. Das Verhältnis der beiden Drucke ändert sich als lineare Funktion der Temperatur, es genügt daher, zwei feste Punkte zu bestimmen, um eine Aichung des Apparates zu erhalten.

678. Aufhebung der Reibung durch Lufteinblasen. Schon S. 774 wurde darauf hingewiesen, daß der Reibungswiderstand fester Körper dadurch verkleinert wird, daß sich eine dünne Luftschicht zwischen denselben befindet. Bei dem in Fig. 3652 (Lb, 500) dargestellten Apparat läßt sich durch Einblasen von Luft zwischen die beiden Platten, deren obere durch ein sinkendes Gewicht in beschleunigte Drehung versetzt wird, zeigen, daß bei genügender Dicke der Luftschicht der Reibungswiderstand der Platten sich außerordentlich vermindert und auf den der Luftschicht reduziert. Praktisch kann man von dieser Erscheinung Gebrauch machen bei Maschinen mit vertikal stehenden schweren rotierenden Achsen, indem man unter die Fläche, auf welcher letztere aufstehen, komprimierte Luft einleitet.

Fig. 3652.



679. Spezifisches Gewicht von Rauch und Nebel. Wird auf einer Wage ein offenes Gefäß tariert und läßt man in dieses einen leichten Körper hineinfallen, so erscheint schon während des Fallens infolge der Luftreibung das Gewicht vergrößert (Fliege in einer offenen Flasche, vergl. S. 984) und bei leichten Körperchen, welche in der Luft schweben, wie z. B. bei den Kohlepartikelchen im Rauch, wird hierdurch eine Vergrößerung des spezifischen Gewichts bedingt, wie wenn die Masse homogen wäre.

680. Mitreißen von Luft durch Wasserstrahlen. Läßt man einen Wasserstrahl von oben in ein weites großes Glasgefäß mit Wasser einströmen, so beobachtet man, daß der Strahl eine große Menge Luft mit sich führt, die in Blasen aufsteigt. Daß dies lediglich eine Folge der Reibung zwischen Luft und Wasser ist, daß nicht etwa die Luft schon in dem Wasser enthalten war, kann man ohne weiteres erkennen, wenn man die Spitze, aus welcher das Wasser austritt, unter die Wasseroberfläche untertaucht. Sofort verschwinden alle Luftblasen, erscheinen aber alsbald aufs neue, sowie man die Spitze aus dem Wasser herauszieht. (Wind beim Trommelbachwasserfall.)

[1]) Bei dem Apparat Fig. 3651 (Müller-Uri, Braunschweig, 15 Mk.) wird die Drehung durch einen äußeren Magneten bewirkt.

Noak (1888) fügt vier enge Messingröhren, wie Fig. 3649 zeigt, unter Zwischenfügung von vier Blechgefäßen auf einem Brett zu einem Quadrat $ABCD$ zusammen und verbindet sie durch eine fünfte diagonale Röhre AD. In die letztere ist die in Fig. 3650 für sich dargestellte Windmühle eingeschaltet. Der dieselbe treibende Luftstrom tritt durch den Hahn bei B ein und bei C aus. Je nach dem Verhältnis der durch Drehen der Hähne in den Zweigleitungen erzeugten Widerstände dreht sich das Windrädchen im einen oder anderen Sinne, oder gar nicht[1].

677. Luftreibung. Daß sich hinter einem Hindernis die Luft ebenfalls bewegt, kann nach Goy (1888) so gezeigt werden, daß man hinter eine Weinflasche eine brennende Kerze stellt und aus 20 bis 30 cm Entfernung auf die Flasche bläst. Das Licht löscht ebenso aus, als ob die Flasche nicht vorhanden wäre. Die Luftstromlinien biegen sich also um die Flasche herum, die Luft gleitet an derselben.

Wäre keine Reibung vorhanden, so würde keine Arbeit verbraucht werden, ebenso wenig als bei Bewegung eines Eisenbahnzuges auf einer Kurve oder bei Bewegung eines Kometen um die Sonne. (Vgl. § 531, S. 1264).

Das Mitreißen der Luft durch einen bewegten Körper kann man an einem Kreisel sehen, dem man ein leicht bewegliches Flügelrädchen nähert, oder einfacher eine Flamme.

Looser benutzt die Manometer seines Doppelthermoskops (S. 1054) unter Beiziehung der durch Luftströme bedingten Verdunstungskälte.

„Man stelle einen schwarz polierten Rezeptor, der mit dem Manometer verbunden ist, auf eine Röhre des Fußbrettes und drücke ein mit Wasser benetztes Stück Filtrierpapier (von etwa 80 mm Durchmesser) auf die polierte Fläche. Dicht davor stellt man einen auf der Schwungmaschine befestigten Pappcylinder (eine runde Pappschachtel wird mit einem in der Mitte des Bodens angebrachten Loche über die Schraube der Schwungmaschine gesetzt und festgeschraubt). Sobald die Flüssigkeitssäule nicht mehr sinkt, stellt man sie, durch momentanes Öffnen des Hahnes, auf Null und setzt den Pappcylinder in schnelle Rotation — sofort zeigt das Manometer eine weitere Abkühlung an."

Fig. 3651.

„Hält man an die entgegengesetzte Seite des rotierenden Cylinders ein brennendes Streichholz oder eine Kerzenflamme, so steigt das Manometer (im mittleren Schenkel) sofort. Die warme Luft wird mindestens eine halbe Umdrehung weit mitgeführt."

Es mag hier auch hingewiesen werden auf die Seitenabweichung der Geschosse, die durch deren Rotation bedingt ist und zwar dadurch, daß deren Längsachse schief steht zur Flugbahn, also eine Luftverdichtung vor der Mantelfläche des Geschosses entsteht, auf welcher dieses infolge der stärkeren Reibung wie auf einer dichteren Unterlage zur Seite rollt.

Zur Demonstration, daß auch im sog. Vakuum noch beträchtliche Reibung vorhanden ist, bedient sich Kundt eines Radiometers mit scheibenförmigem Rad, welchem in einigem Abstand eine zweite drehbare Scheibe, aber ohne Flügel, parallel und koaxial gegenübersteht. Letztere kommt allmählich in gleichsinnige Drehung, wie die erstere. Um die Drehung sichtbar zu machen,

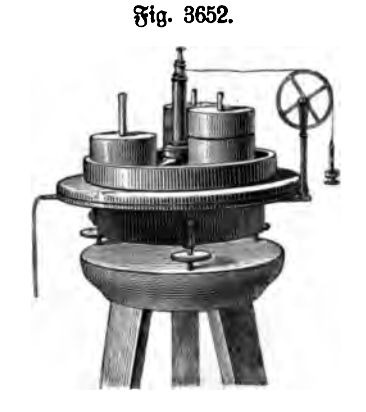
[1] Der Apparat ist zu beziehen von Liebrichs Nachfolger in Gießen zu 40 Mk.

ist die Scheibe mit geeigneten Marken versehen. Der Versuch eignet sich gut zur Projektion[1]).

Innerhalb gewisser Grenzen ist die Gasreibung unabhängig vom Druck, dagegen wächst sie beträchtlich mit der Temperatur, wie sich auch aus der im folgenden Kapitel zu besprechenden kinetischen Gastheorie ergibt. Eine Nutzanwendung hiervon ist das Viskositätspyrometer von Job (Z. 15, 166, 1902). Derselbe Gasstrom, z. B. elektrolytisch entwickelter Wasserstoff, wird nach einander durch eine kalte Kapillare und eine auf die zu messende Temperatur erhitzte geleitet, wobei im zweiten Fall infolge der vergrößerten Reibung der an einem Manometer abgelesene Druck größer ist. Das Verhältnis der beiden Drucke ändert sich als lineare Funktion der Temperatur, es genügt daher, zwei feste Punkte zu bestimmen, um eine Aichung des Apparates zu erhalten.

678. Aufhebung der Reibung durch Lufteinblasen. Schon S. 774 wurde darauf hingewiesen, daß der Reibungswiderstand fester Körper dadurch verkleinert wird, daß sich eine dünne Luftschicht zwischen denselben befindet. Bei dem in Fig. 3652 (Lb, 500) dargestellten Apparat läßt sich durch Einblasen von Luft zwischen die beiden Platten, deren obere durch ein sinkendes Gewicht in beschleunigte Drehung versetzt wird, zeigen, daß bei genügender Dicke der Luftschicht der Reibungswiderstand der Platten sich außerordentlich vermindert und auf den der Luftschicht reduziert. Praktisch kann man von dieser Erscheinung Gebrauch machen bei Maschinen mit vertikal stehenden schweren rotierenden Achsen, indem man unter die Fläche, auf welcher letztere aufstehen, komprimierte Luft einleitet.

Fig. 3652.



679. Spezifisches Gewicht von Rauch und Nebel. Wird auf einer Wage ein offenes Gefäß tariert und läßt man in dieses einen leichten Körper hineinfallen, so erscheint schon während des Fallens infolge der Luftreibung das Gewicht vergrößert (Fliege in einer offenen Flasche, vergl. S. 984) und bei leichten Körperchen, welche in der Luft schweben, wie z. B. bei den Kohlepartikelchen im Rauch, wird hierdurch eine Vergrößerung des spezifischen Gewichts bedingt, wie wenn die Masse homogen wäre.

680. Mitreißen von Luft durch Wasserstrahlen. Läßt man einen Wasserstrahl von oben in ein weites großes Glasgefäß mit Wasser einströmen, so beobachtet man, daß der Strahl eine große Menge Luft mit sich führt, die in Blasen aufsteigt. Daß dies lediglich eine Folge der Reibung zwischen Luft und Wasser ist, daß nicht etwa die Luft schon in dem Wasser enthalten war, kann man ohne weiteres erkennen, wenn man die Spitze, aus welcher das Wasser austritt, unter die Wasseroberfläche untertaucht. Sofort verschwinden alle Luftblasen, erscheinen aber alsbald aufs neue, sowie man die Spitze aus dem Wasser herauszieht. (Wind beim Trommelbachwasserfall.)

[1]) Bei dem Apparat Fig. 3651 (Müller-Uri, Braunschweig, 15 Mk.) wird die Drehung durch einen äußeren Magneten bewirkt.

681. Die Strahlluftpumpen und -Gebläse. Wassertrommelgebläse. Ein Modell einer solchen Vorrichtung kann man aus Glas sehr leicht zusammensetzen. Fig. 3653 zeigt den theoretisch interessanten Apparat. An der Glasröhre *b*, welche oberhalb eine ziemliche Zahl von Löchern von etwa 3 mm Durchmesser hat, steckt der Trichter *a*; über die Vereinigungsstelle beider ist ein starkes Kautschukrohr gestreift, die Röhre *b* geht nebst der gebogenen Röhre *c* luftdicht durch den Kork am Halse des Gefäßes *d*, dessen Boden abgesprengt ist. Das Gefäß *d* steht im Gefäße *f* auf drei Holzstückchen, bei *g* fließt das Wasser ab. Gießt man nun Wasser in den Trichter, so reißt dieses beim Herunterfließen Luft durch die Löcher mit, welche sich im oberen Raume des Gefäßes *d* ansammelt und durch das Glasrohr *c* austritt.

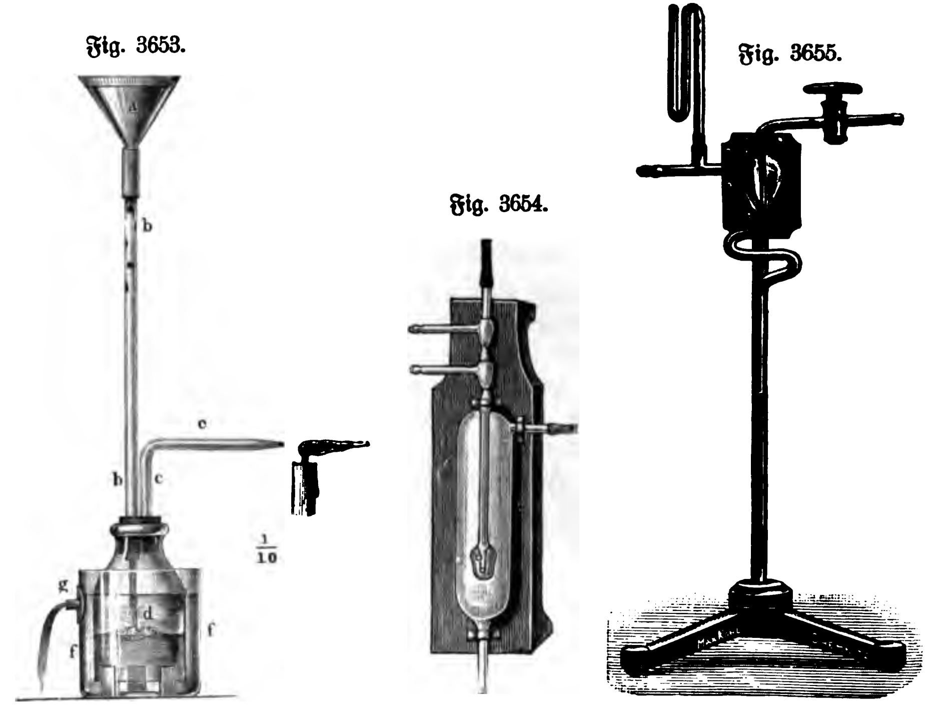


Fig. 3653. Fig. 3654. Fig. 3655.

v. Lang (1885) läßt den Wasserstrahl so herabfließen, daß er die Röhre nicht ganz ausfüllt.

Ein Wasserstrahlgebläse in gewöhnlicher Ausführung, welches auch als Wasserluftpumpe benutzt werden kann, zeigt Fig. 3654 (E, 16); eine einfache Wasserluftpumpe Fig. 3655 (K, 18); eine größere vierfache Wasserluftpumpe nach Körting Fig. 3656 (Hu, 75). (Siehe auch S. 30 u. S. 34[1]).

Um große Luftmassen mit geringem Druck in Bewegung zu setzen, ist es nötig, den Wasserstrahl mittels Streudüsen in feine Tröpfchen zu zerstäuben. Hierauf beruhen die Wasserstaubventilatoren von Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover (Preis 120 bis 300 Mk.).

[1] Wasserstrahlluftpumpen in verschiedenster Auswahl sind zu beziehen von Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover; M. Stuhl, Glasinstr.-Fabrik, Berlin, Philippstr. 22; Kähler u. Martini, Fabrik chemischer und bakteriologischer Apparate, Berlin N., Chausseestr. 3; Warmbrunn, Quilitz u. Co., Glasbläserei u. mechanische Werkstätte, Berlin NW. 40, Haidestr. 55 bis 57, und von anderen.

Fig. 3656.

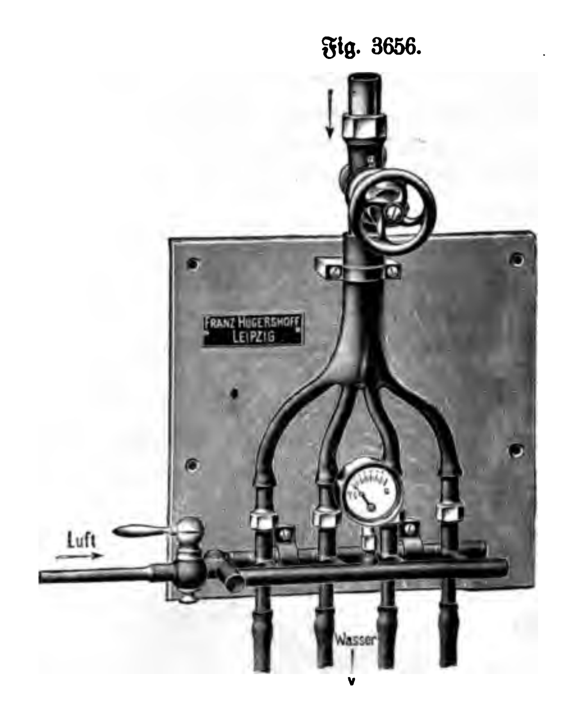


Fig. 3657. Fig. 3658.

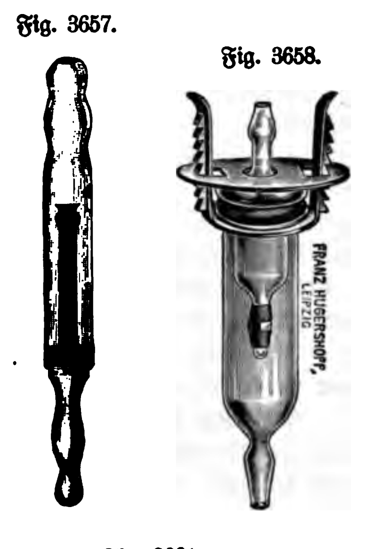


Fig. 3661.



Fig. 3659. Fig. 3660.

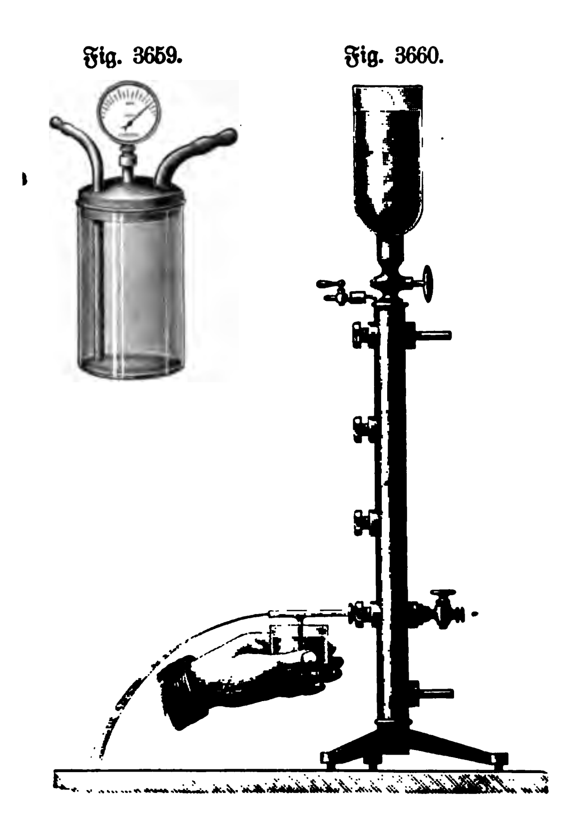
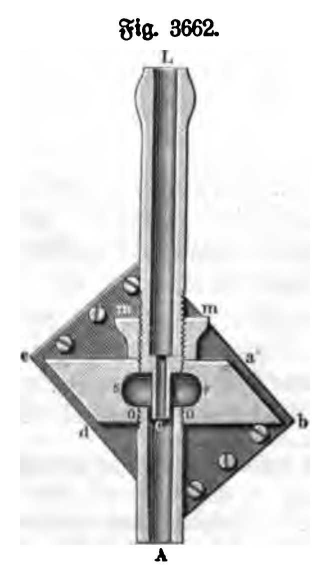


Fig. 3662.



Beim Gebrauch der Wasserluftpumpen muß dafür gesorgt werden, daß beim Abstellen der Pumpe nicht durch den äußern Luftdruck Wasser in den evakuierten Rezipienten oder die Zuleitung zu demselben getrieben werden kann. Dies läßt sich vermeiden durch Einschaltung eines Rückschlagventils nach Bunsen, Fig. 3657 (Hu, 1), oder nach Wislicenus, Fig. 3658 (Hu, 1,25), oder auch durch Einschaltung eines Übersteiggefäßes, Fig. 3659 (Hu, 15), aus welchem die Pumpe das eingetretene Wasser selbsttätig wieder absaugt.

Auf der Reibung zwischen Luft und Wasser beruht es auch, daß ein Wasserstrahlinjektor (S. 1410) auch dann wirkt, wenn eine kurze Steigröhre daran angebracht ist, wie z. B. durch den Apparat Fig. 3660 (K, 180) gezeigt werden kann.

Fig. 3661 zeigt eine Ansicht des Hauptteiles der Quecksilberstrahlpumpe von v. Feilitzsch (1877).

Das Pumpwerk nebst der an derselben angeschraubten Ausflußvorrichtung (Fig. 3662) steht in einem gußeisernen, teilweise mit Quecksilber zu füllenden Trog, aus dem die Pumpen das Quecksilber entnehmen und in welchem dasselbe nach Vollführung des Kreislaufes aus der Öffnung *A* wieder zurückfließt[1]).

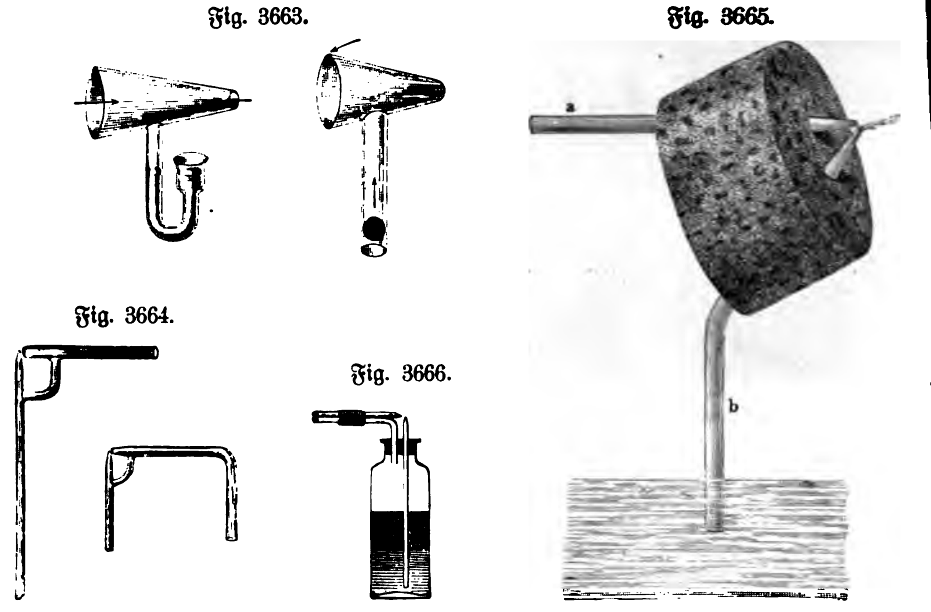


Fig. 3663. Fig. 3665.

Fig. 3664. Fig. 3666.

682. **Zerstäuber** (Aeolus). Recht instruktiv sind die in Fig. 3663 dargestellten kleinen Apparate. Bläst man in der Richtung der Pfeile, so steigt oder fällt beim ersteren das Wasser des Manometers, beim zweiten wird die Kugel im Ansatzrohre gehoben. (S, 4.)

Looser verbindet das Steigrohr eines Zerstäubers[2]) mit dem Manometer seines Doppelthermoskops.

Steckt man, wie in Fig. 3665 (nach Weinhold), zwei zugespitzte Glasröhren durch einen Kork, wovon die eine *b* so abgebogen ist, daß sie zur anderen *a* etwa

[1]) Eine Pumpe dieser Art befand sich auf der Londoner Ausstellung wissenschaftlicher Apparate im Mai 1876 (Nr. 595 des Katalogs), hat aber keine weitere Anwendung gefunden. — [2]) Zerstäuber nach Fig. 3664 liefert z. B. Müller-Uri, Braunschweig. Sie sind auch bei jedem Glasbläser oder Bandagisten als Inhalationsapparate zu er-

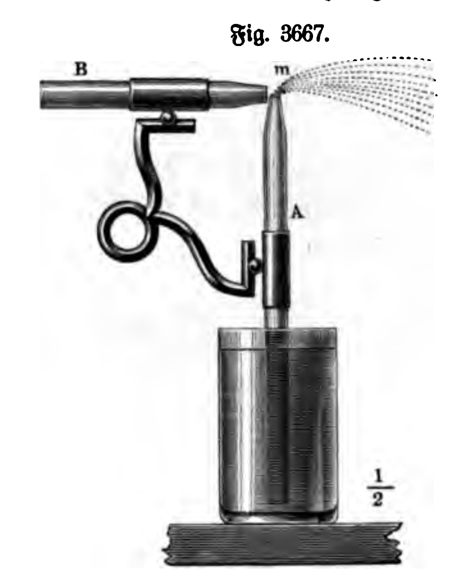
rechtwinklig steht, hält den Kork mit der Hand so, daß *b* in irgend einen Wasserbehälter reicht und bläst durch *a*, so steigt das Wasser in *b* bis zur Mündung, vorausgesetzt, daß die Steighöhe nicht zu groß ist, und wird vom Luftstrom fortgeführt. Andere einfache Anordnungen zeigen Fig. 3666 (E, 2,50) und Fig. 3667.

Ich pflege einen solchen Zerstäuber aus Metall mit der Kompressorleitung von 8 Atm. Druck (S. 129) zu verbinden, wobei weithin sichtbare Wolken von zerstäubtem Wasser entstehen.

Ein größerer, nach Art eines Injektors ausgeführter Apparat auf Stativ wird dazu gebraucht, die Entleerung eines Wassergefäßes durch einen Luftstrahl zu zeigen.

Sehr schön zeigt sich die Saugwirkung von Luftstrahlen bei einem unter 8 Atm. austretenden vertikal aufsteigenden kräftigen Strahl auf der Kompressorleitung (S. 129). Bringt man einen an einem steifen Draht befestigten brennenden Ballen mit Benzin getränkter Baumwolle in die Nähe, so wird diese große flackernde Flamme schon aus erheblicher Entfernung gegen den Strahl hingezogen und erscheint da, wo sie den Strahl berührt, vollkommen abgeschnitten [1]).

Fig. 3667.



Im kleinen kann man eine ähnliche Wirkung sehen beim Durchblasen eines Luftstromes durch eine Flamme mittels

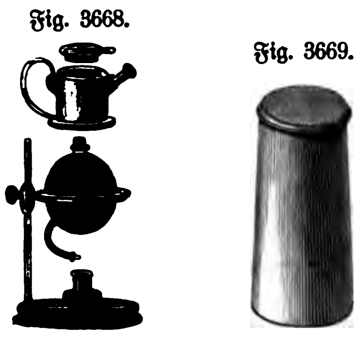


Fig. 3668. Fig. 3669.

des Lötrohres. Die Flamme wird nicht nur in der Richtung des Luftstromes mitgezogen, sondern dieser bohrt gewissermaßen ein Loch durch die Flamme, indem die nächst benachbarten Schichten, die durch Reibung die Bewegung übertragen könnten, in den Strahl hineingesaugt werden und verschwinden, während die Flamme in Ruhe bleibt. Bei den gewöhnlichen Gebläsebrennern und Bunsenbrennern tritt durch die gleiche Wirkung eine innige Mischung von Gas und Luft ein. Ähnliches gilt für die Äolipile (Fig. 3668 Lb, 12) oder Lötlampe (S. 475).

---

halten. Auch zum Zerstäuben wohlriechender Stoffe, zum Besprengen von Pflanzen, zum Fixieren von Kreidezeichnungen mit Mastixlösung und selbst zum Aufsprühen von Farblösungen statt des Auftragens mit dem Pinsel sind besondere mehr oder minder komplizierte Vorrichtungen käuflich. „Pneumatische Pinsel" sind zu beziehen von E. Liesegang in Düsseldorf. (Preis nebst zugehöriger Luftpumpe und Lufttrommel 200 Mk., Staffelei dazu 20 Mk. Preßluft-Spritz-Apparate zum Auftragen von Farben, Lacken, Glasuren, heißem Leim u. s. w. liefert A. Serényi, Berlin C., Kaiser Wilhelmstr. 3.

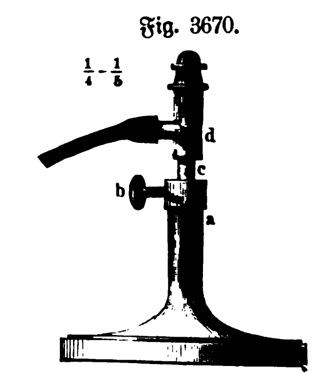
[1]) Rebenstorff, Z. 18, 16, 1905, zeigt die Saugwirkung eines Luftstrahles durch Zusammenschrumpfen eines Kollodiumballons.

Der austretende Strahl von Weingeist- oder Benzindampf saugt sich selbst die zur Bildung einer Gebläseflamme nötige Luft an.

Einen großen Bunsenbrenner mit etwa 1,5 m hoher Flamme kann man sich nach Fig. 3669 aus einem Ofenrohr von etwa 1,5 m Länge herstellen, welches man mit Drahtnetz bedeckt und über ein zölliges Gasausströmungsrohr hält. Es entsteht eine gegen 1 m hohe und über 1 dcm dicke nicht leuchtende heiße Flamme.

Ein kleiner Brenner, den man sich selbst herstellen kann, ist in Fig. 3670 dargestellt. Auf den cylindrischen Teil unterhalb des Brenners paßt der dreiarmige Träger, Fig. 3671 und 3672, und auf die inneren Einschnitte desselben das Blechrohr, Fig. 3669, auf welches ein Stück groben Drahttuches gebunden ist, etwa 180 bis 200 Maschen auf den Quadratcentimeter. Das Blechrohr muß etwa 6 cm über die Öffnungen heraufragen, aus welchen das Gas kommt.

Fig. 3670.



683. Injektor. Zur Demonstration benutze ich einen größeren Injektor[1]) auf eisernem Stativ, welcher an die Dampfleitung angeschlossen wird und das aus einem Gasbehälter angesaugte Wasser durch ein Steigrohr bis zur Decke des Saales treibt, von wo es frei herabfällt. Durch die Verdichtung des Dampfes findet

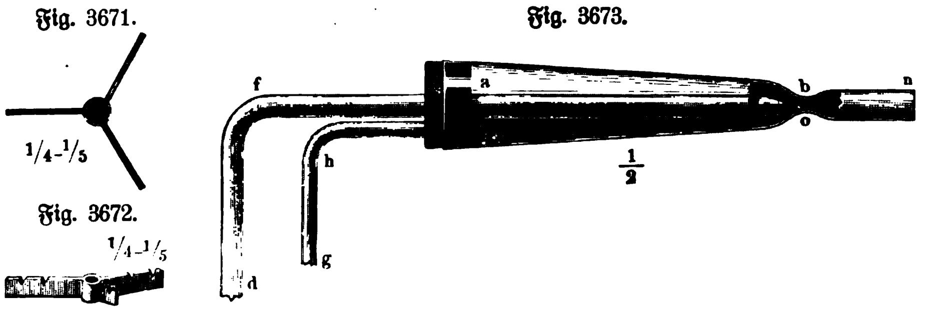


Fig. 3671. Fig. 3672. Fig. 3673.

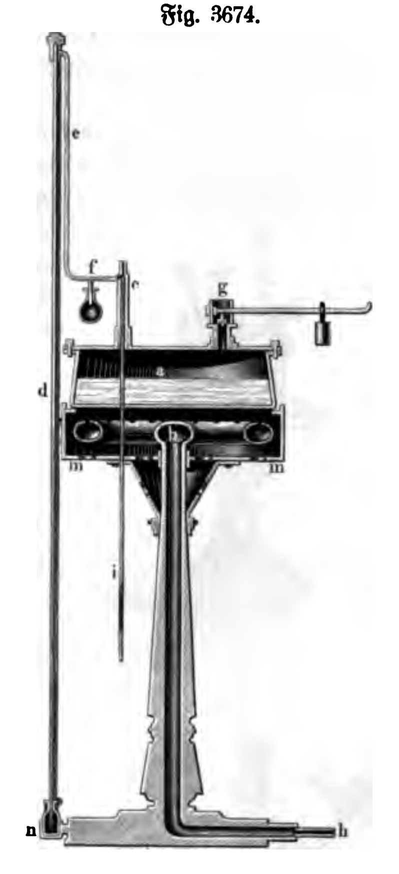
auch eine Verdichtung seiner Energie statt, derart, daß er als Wasserstrahl in denselben Kessel einzudringen vermag, aus welchem er herausströmt.

Einen dem Giffardschen Injektor nachgebildeten Apparat kann man nach Reichert aus Glas und Kork, wie in Fig. 3673, zusammensetzen. Das konische Glasrohr *an* ist bei *ob* ziemlich eng ausgezogen (die Figur zeigt diesen Teil aufgeschnitten) und das in eine Spitze ausgezogene Glasrohr *df* reicht mit seiner Spitze bis in die verengte Stelle; das zweite Rohr *gh* reicht nur eine Strecke weit in *an* hinein. Wird nun *df* mit einem Dampfkesselchen in Verbindung gebracht, *gh* aber mit einem Wasserbehälter, so wird das Wasser bei *n* ausgetrieben, wenn der Dampf genügende Spannung hat[2]).

[1]) Injektoren sind zu beziehen von Schaeffer und Budenberg, Maschinen- und Dampfkessel-Armaturen-Fabrik, Magdeburg-Buckau (zu 33 bis 200 Mk.); Hans Reifert, Köln u. a. Rebenstorff (Z. 12, 13, 1899) benutzt einen einfachen, lediglich aus Glasröhren und Kautschukschlauch hergestellten Injektor, um einen kleinen Springbrunnen zu erzeugen. — [2]) Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover liefern Dampfstrahlpumpen (Fig. 3581, S. 1410) oder Elevatoren (zu 20 bis 160 Mk.), Dampfstrahlventilatoren, Dampfzerstäuber für Naphtafeuerung, Dampfstrahlfeuerspritzen u. s. w.

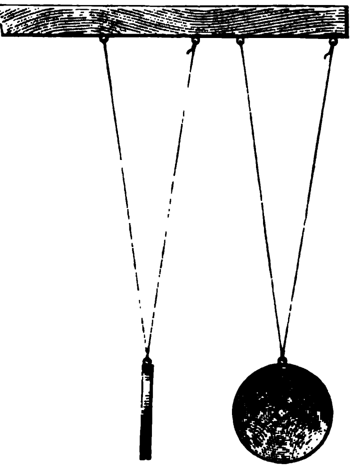
Teclu (1878) schlägt eine nach ähnlichem Prinzip gebaute Dampfstrahlluftpumpe (Fig. 3674) vor, welche die Wasserluftpumpe da ersetzen soll, wo eine Wasserleitung nicht zu Gebote steht. Dieselbe vermag bis zu 21 mm zu evakuieren und kann daher bei mangelnder Wasserleitung an Stelle einer Wasserluftpumpe gute Dienste leisten. Aus dem durch den Brenner *b* geheizten Dampfkessel mit Sicherheitsventil *g* gelangt der Dampf durch eine Spitze bei *c* ins Freie. In den diese Spitze umgebenden Mantel münden einerseits die Saugröhre *i*, anderseits das zum Manometer *en* führende Rohr *f*.

Fig. 3674.



684. Trägheitswiderstand. Was bezüglich des Widerstandes von Flüssigkeiten gesagt wurde, gilt auch für die Luft. Die Luftreibung macht nur einen kleinen Teil des Luftwiderstandes aus. Die Luftreibung hindert nur das Gleiten der Luftschichten aneinander, dem Fortstoßen stellt sich dagegen der Trägheitswiderstand entgegen, ebenso wie der Widerstand eines auf einem Tische liegenden Holzklotzes oder eines Wagens gegen Fortbewegung sich zusammensetzt aus zwei Teilen, dem von dem Gleiten auf der Tischfläche bezw. dem Rollen der Räder herrührenden Reibungswiderstande und dem gegen die Annahme des Bewegungszustandes sich geltend machenden Trägheitswiderstande, der auch dann vorhanden wäre, wenn die Reibung gleich Null wäre. Bei Bewegung eines Körpers in Luft müssen immer neue Luftmassen in Bewegung gesetzt werden, der Trägheitswiderstand macht sich also nicht nur, wie beim Verschieben des Holzklotzes oder des Wagens anfänglich, sondern fortwährend geltend.

Fig. 3675.

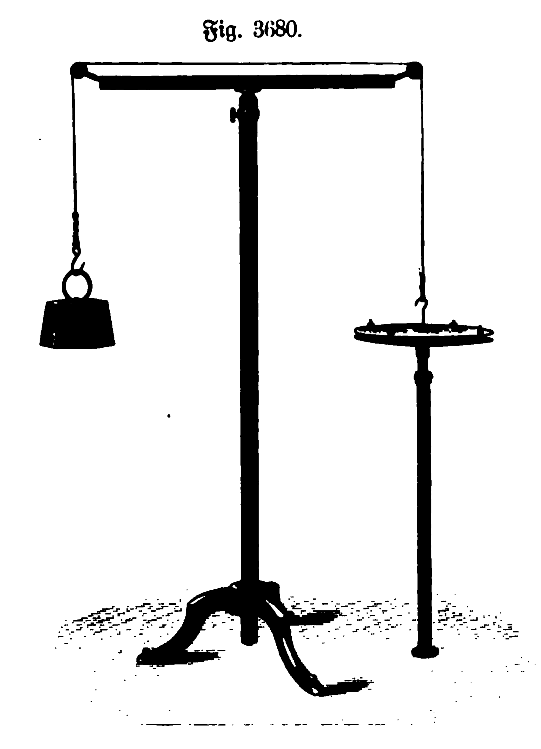


Zur Demonstration eignen sich besonders zwei gleich beschaffene Pendel mit dünnen Scheiben als Linsen, von welchen eines sich so bewegt, daß die Fläche der Linse in der Schwingungsebene sich befindet, also vorwiegend die Reibung zur Geltung kommt, während beim anderen die Fläche der Linse die Luft vor sich hertreibt, so daß hauptsächlich der Trägheitswiderstand von Einfluß ist. Letzterer erweist sich viel größer (Fig. 3675, nach G. Wiedemann).

Zu gleichem Zweck dient ein Kreisel mit Windflügeln, welche sich entweder senkrecht oder parallel zur Kreiselebene stellen lassen. Im ersten Falle kommt der

schließen, daß bei Vulkanausbrüchen feinster Staub in außerordentlich gro… sich jahrelang schwebend zu erhalten vermag. (Schweben der Vögel, Luft… ballon, Tennisball, Drachen, Flugmaschinen).

686. Stoßkraft. Um die kräftige Stoßwirkung eines Luftstrahls, die … Prinzip nach gleichen Gesetzen berechnen läßt wie die Stoßkraft eines Flü… strahls, zu demonstrieren, pflege ich einen Strahl von 8 Atmosphären Dru… unten gegen einen 25-Pfund-Stein (= 12,5 kg) zu leiten, welcher von einem … förmigen Stativ getragen wird. Beim Öffnen des Hahns wird nicht nur … schwere Gewichtsstein, sondern zuweilen auch das Stativ fortgeblasen. Um … schädigung des Bodens zu ver… wird dort ein altes Brett au… Eventuell kann man das S… an eine von der Decke … hängende Schnur anbinden. (… druck bei Gebäuden.)


Fig. 3680.

Quantitative Versuche un… Anwendung einer von einer Fe… wage getragenen Platte, ge… welche der Luftstrahl stößt, e… geben keine gute Übereinstimmung mit der Theorie. Man kann sogar, indem man den Strahl nicht einfach aus einer Röhre, sondern aus der Mitte einer Scheibe austreten läßt, statt des erwarteten Druckes auf die Scheibe einen Zug erhalten.

Sehr auffallend wird nach Hagenbach dieser Versuch von Hachette, wenn man Scheiben von großen Dimensionen nimmt und einen kräftigen Luftstrahl, welcher durch einen großen Kompressor erzeugt wird. Ich verwende dazu Scheiben von etwa 50 cm Durchmesser und einen Druck von 8 Atm. Der Strahl tritt senkrecht aus der unteren Scheibe heraus und stößt gegen die obere, welche in der Mitte an einer über Rollen geführten Schnur mit Gegengewicht aufgehängt ist (Fig. 3680). Um eine seitliche Verschiebung der oberen Platte sowie allzuweite Entfernung zu verhindern, sind Stifte angebracht wie bei Fig. 3681.

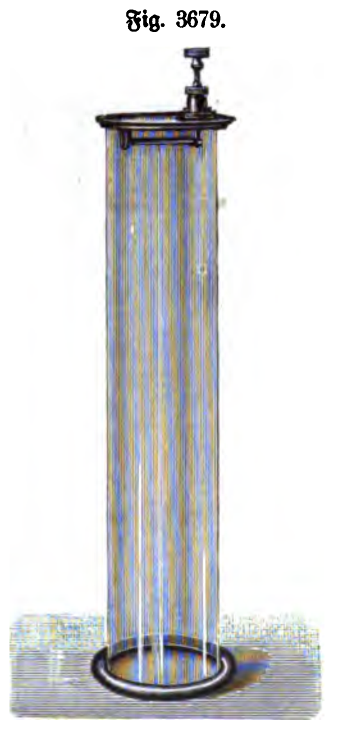
Sobald der Hahn geöffnet wird, wird die obere Scheibe trotz der großen Stoßkraft des Strahls gegen die untere hingezogen und es ist ein Gewicht von mehr als 25 kg nötig, um diese Anziehung zu hindern. Die Wirkung ist dadurch bedingt, daß sich die Luft zwischen den beiden Platten radial ausbreitet und dabei, da sie infolge der Trägheit die Geschwindigkeit zu behalten sucht, verdünnt, so daß der äußere Luftdruck über die Stoßkraft bedeutend überwiegt.

Im kleinen kann man dasselbe zeigen durch den Apparat Fig. 3681 nach Clement und Desormes. Auf eine Blechscheibe von 6 bis 12 cm Durchmesser,

685. **Fall der Körper im luftverdünnten Raume.** Am einfachsten nimmt man hierzu eine etwa 1 bis 2 m lange und 3 bis 5 cm weite Glasröhre, die oben nd unten eine messingene, gut aufgekittete Fassung erhält und einerseits mit einem ahne versehen ist. Man bringt ein paar kleine Postpapierblättchen und ein Bleiügelchen hinein, und zeigt vor dem Auspumpen den Unterschied der Fallzeiten, indem an die Röhre wiederholt in die vertikale Lage umkehrt; ebenso verfährt man nachher.

Man hat auch vielerlei Vorrichtungen konstruiert, um durch dieselben die örper oben in der Röhre zu gleicher Zeit loszulassen (Fig. 3679 Lb, 22). Alle rfordern aber nach jedesmaligem Versuche ein erneutes Auspumpen, während man uf die angegebene Weise den Versuch rasch wiederolen kann, wenn die Erscheinung selbst beim ersten Male sich nicht ganz deutlich herausstellen sollte.

Fig. 3679.



Eine sehr lange Fallröhre kann man durch Aufeinanderkitten mehrerer, mit abgeschliffenem Rand ersehener cylindrischer Röhren (mittels Wachs oder esser einer Mischung von Kolophonium und Leinölirnis) herstellen. Mittels einer der Pumpen S. 131 ann sie rasch evakuiert werden.

Als Fallschirm kann eventuell ein Regenschirm, n welchem ein Gewicht angehängt wird, benutzt verden[1]).

Schüttet man nach F. Plateau Seifenwasser us einer Tasse aus einiger Höhe derart aus, daß nan sich dabei rasch dreht oder wenigstens den Arm on einer Seite zur anderen bewegt, so bildet das Seifenwasser eine Lamelle, welche sich rasch in hohle Kugeln von einigen Centimetern Durchmesser verwandelt. Diese Kugeln platzen dann nach einigen Sekunden.

Man hat früher auf ähnliche Weise die Umbildung der durch Kondensation entstehenden Wassertröpfchen, welche die Wolken zusammensetzen, in Bläschen (Nebelbläschen) zu deuten versucht, deren Existenz man zur Erklärung des Schwebens der Wolken annehmen zu müssen glaubte.

Tatsächlich gibt es keine solche Bläschen und das Schweben der Wolken erklärt ich teils durch den großen Luftwiderstand, welcher sich dem Fallen der Tröpfchen ntgegensetzt, teils dadurch, daß die unteren Tröpfchen der Wolke fortwährend durch Verdampfung verschwinden, während sich oben neue bilden. Bei konstanter Temperatur kann man aus der Geschwindigkeit, mit welcher der Nebel sinkt, die Größe der Tröpfchen berechnen.

Wie außerordentlich groß der Luftwiderstand bei kleinen Partikelchen ist, kann man leicht bei staubiger Luft beobachten und insbesondere aus der Tatsache er-

---

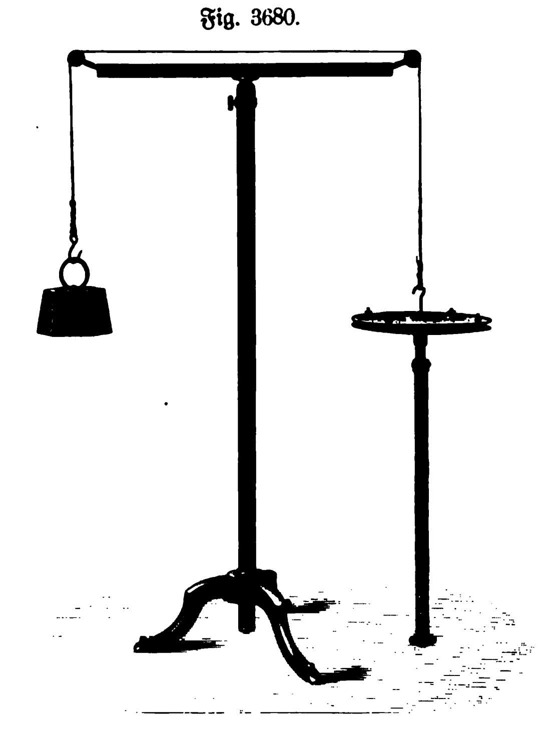
1903) läßt von einer Magnetnadel parallel der Längsrichtung angeklebte Fahnen aus Blattgold herabhängen. Im Vakuum bleiben dieselben bei den Schwingungen der Magnetnadel vollkommen senkrecht.

[1]) Ein kleiner Luftballon mit Fallschirm ist zu haben bei C. Wiedling in München, Maximilianstr. 33.

schließen, daß bei Vulkanausbrüchen feinster Staub in außerordentlich großen Höhen sich jahrelang schwebend zu erhalten vermag. (Schweben der Vögel, lenkbarer Luftballon, Tennisball, Drachen, Flugmaschinen).

686. Stoßkraft. Um die kräftige Stoßwirkung eines Luftstrahls, die sich im Prinzip nach gleichen Gesetzen berechnen läßt wie die Stoßkraft eines Flüssigkeitsstrahls, zu demonstrieren, pflege ich einen Strahl von 8 Atmosphären Druck von unten gegen einen 25-Pfund-Stein (= 12,5 kg) zu leiten, welcher von einem ringförmigen Stativ getragen wird. Beim Öffnen des Hahns wird nicht nur dieser schwere Gewichtsstein, sondern zuweilen auch das Stativ fortgeblasen. Um Beschädigung des Bodens zu verhüten, wird dort ein altes Brett aufgelegt. Eventuell kann man das Gewicht an eine von der Decke herabhängende Schnur anbinden. (Winddruck bei Gebäuden.)

Fig. 3680.



Quantitative Versuche unter Anwendung einer von einer Federwage getragenen Platte, gegen welche der Luftstrahl stößt, ergeben keine gute Übereinstimmung mit der Theorie. Man kann sogar, indem man den Strahl nicht einfach aus einer Röhre, sondern aus der Mitte einer Scheibe austreten läßt, statt des erwarteten Druckes auf die Scheibe einen Zug erhalten.

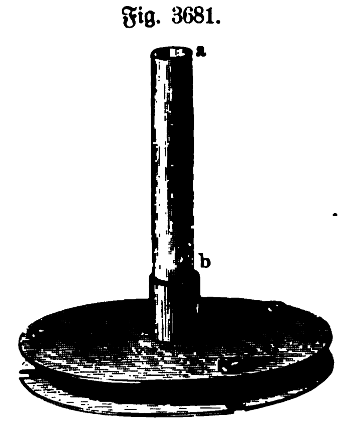
Sehr auffallend wird nach Hagenbach dieser Versuch von Hachette, wenn man Scheiben von großen Dimensionen nimmt und einen kräftigen Luftstrahl, welcher durch einen großen Kompressor erzeugt wird. Ich verwende dazu Scheiben von etwa 50 cm Durchmesser und einen Druck von 8 Atm. Der Strahl tritt senkrecht aus der unteren Scheibe heraus und stößt gegen die obere, welche in der Mitte an einer über Rollen geführten Schnur mit Gegengewicht aufgehängt ist (Fig. 3680). Um eine seitliche Verschiebung der oberen Platte sowie allzuweite Entfernung zu verhindern, sind Stifte angebracht wie bei Fig. 3681.

Sobald der Hahn geöffnet wird, wird die obere Scheibe trotz der großen Stoßkraft des Strahls gegen die untere hingezogen und es ist ein Gewicht von mehr als 25 kg nötig, um diese Anziehung zu hindern. Die Wirkung ist dadurch bedingt, daß sich die Luft zwischen den beiden Platten radial ausbreitet und dabei, da sie infolge der Trägheit die Geschwindigkeit zu behalten sucht, verdünnt, so daß der äußere Luftdruck über die Stoßkraft bedeutend überwiegt.

Im kleinen kann man dasselbe zeigen durch den Apparat Fig. 3681 nach Clement und Desormes. Auf eine Blechscheibe von 6 bis 12 cm Durchmesser,

welche in der Mitte eine Öffnung hat, wird eine Hülse *b* gelötet, und in diese eine passende Glasröhre *a* gekittet. Bläst man durch die Röhre, während man die Blechscheibe vertikal und ein Blatt Papier in der Entfernung von etwa 1 cm dagegen hält, so klappt dieses rasch gegen die Öffnung und oscilliert vor derselben. Man kann den Versuch auch so abändern, daß man an der Scheibe drei dünne Stifte anbringt, ein ebenfalls rundes Blatt Kartenpapier mit etwas weiten, den Stiften entsprechenden Öffnungen an diese steckt und nachher die Stifte umbiegt; hierbei hält man dann die Blechscheibe nach unten, wie die Figur zeigt.

Fig. 3681.



Noch einfacher wird der Apparat, wenn man das Glasrohr in einen kurzen Kork steckt, diesen mit dem Rohre eben schneidet und dann eine etwa 6 bis 10 cm breite, runde Scheibe von dünnem, glattem Pappendeckel (jene Sorte, wie sie zum Pressen der wollenen Tücher verwendet wird, ist zu gar vielen Zwecken brauchbar) an den Kork leimt, welche Scheibe ebenfalls durchlöchert wird. Nahe am Rande steckt man drei glatte Drähte durch und an diese eine Scheibe aus starkem Papier, die mit der Pappscheibe gleich groß ist. Die Löcher für die Drähte werden verhältnismäßig weit gemacht und die Drähte an beiden Enden umgebogen.

Auffallend ist auch, daß ein Filter in einem Glastrichter in den Trichter hineingezogen wird, wenn man es durch Blasen in die Trichterröhre hinauszublasen versucht. Ein Trichter aus biegsamem Papier wird beim Hineinblasen zusammengezogen.

687. **Die frei schwebende Kugel.** Sehr interessant ist, daß durch einen kräftigen Luftstrahl eine große Kugel völlig freischwebend im Raume erhalten werden kann. Ich verwende hierzu wieder denselben Luftstrahl von 8 Atm. Druck, welcher aus einer Spitze von etwa 1 cm Weite austritt. Als Kugel dient eine Zelluloidkugel von etwa 15 cm Durchmesser. Sie schwebt etwa 2 m hoch frei über der Ausströmungsöffnung und fällt auch dann nicht herunter, wenn der Luftstrahl schräg gerichtet wird bis zu einem Winkel von 45° mit der Vertikalen. Sie hängt dann an der unteren Seite des Luftstrahls und wird durch die angesaugte Luft fortwährend emporgehoben. Im übrigen ist die Erscheinung ganz ähnlich dem Tanzen einer Kugel auf einem Springbrunnen, worauf bereits früher (S. 1416) hingewiesen wurde.

Statt des Luftstrahles kann auch ein Dampfstrahl angewendet werden. Die Ausströmungsöffnung wird zweckmäßig mit einem Trichter aus Drahtnetz versehen, welcher die Kugel beim Herabfallen auffängt und dem Strahl wieder zuführt.

Hagenbach empfiehlt ferner, den durch die Verschiedenheit der inneren Reibung bedingten Unterschied im Verhalten eines weichen und gekochten Eies zu zeigen, wenn sie auf dem Luftstrahl tanzen.

688. **Pendel- und Radanemometer.** Die Stoßwirkung des Windes gegen eine Platte, die sich um eine horizontale Achse dreht, kann verwertet werden zur Konstruktion

eines Instruments, welches die Größe der Luftgeschwindigkeit beurteilen läßt. Ein solches Pendelanemometer zeigt Fig. 3682 (Lb, 50); ein einfacheres Fig. 3683 (E, 47).

Genauere Resultate ergeben Windräder, welche analog konstruiert werden können wie die Wasserräder. Derartige Anemometer sind dargestellt in den Fig. 3684 und 3685.

689. Windmühlen. Die Panemoren (Fig. 3684) haben die Eigentümlichkeit, daß die Umdrehungsrichtung nicht von der Windrichtung abhängt[1]).



Fig. 3682.

Fig. 3683.

Fig. 3684.

Fig. 3685.

Fig. 3686.

Bei den polnischen Windrädern ist die Hälfte des Rades durch ein Gehäuse der Einwirkung des Windes entzogen.

---

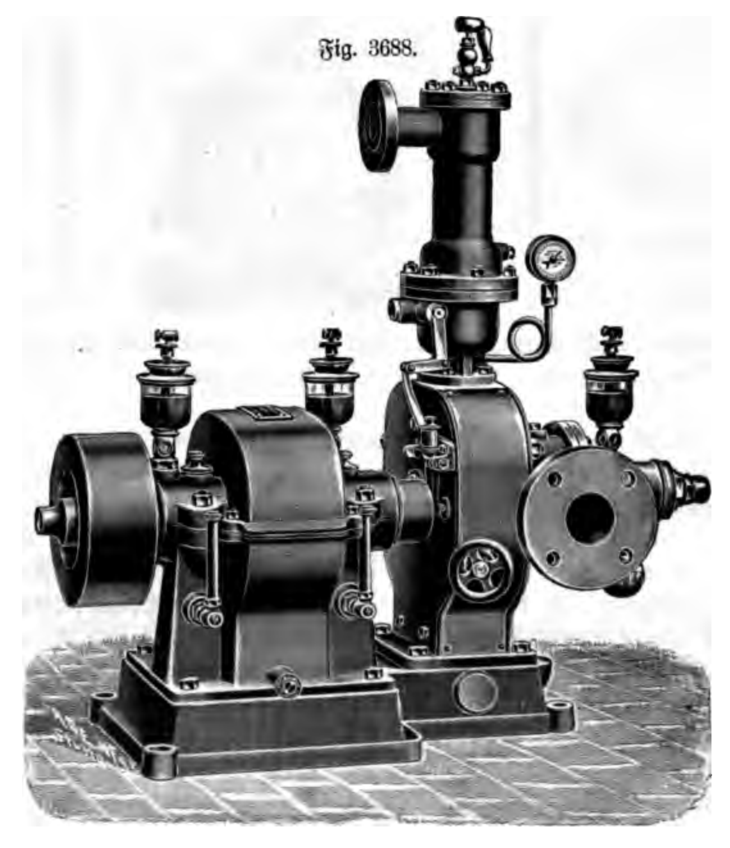
[1]) Zu beziehen von O. Ney, Berlin SW., Wilhelmstr. 34. Andere Anemometer liefern Fueß, Berlin-Steglitz; Rosenmüller, Dresden N., Hauptstraße 18 (36 bis 75 Mk.); Hugershoff, Leipzig; Max Kohl, Chemnitz, u. a. Anemometer zur Aichung von Aspiratoren liefern Spindler u. Hoyer, Göttingen zu 15 Mk., Vertikalanemometer zur Bestimmung der Geschwindigkeit von Luftballons zu 20 Mk.

Das Prinzip kann man schon zeigen bei den bekannten kleinen Windmühlen aus Papier, welche als Kinderspielzeug dienen. Größere, welche eventuell auch durch Dampf angeblasen werden können, kann man sich aus dünnem Blech herstellen[1]) (Sirene).

Fig. 3687.

Kleiber (Z. 16, 72, 1903) beschreibt unter der Bezeichnung Celmeter einen Geschwindigkeitsmesser, dessen Hauptteil ein Windrädchen ist.

[1]) Eigentliche Windmotore liefert G. R. Herzog, Windmotorenfabrik, Dresden A. Eine Turbine, welche durch Kohlensäure unter hohem Druck betrieben wird, nach Fig. 3686 liefert das phys.-mech. Institut von Dr. Th. Edelmann in München zu 300 Mk. Einen kleinen Motor nach Fig. 3687, welcher sowohl als Turbine für Wasser wie auch als Dampfturbine gebraucht werden kann, liefert Hugershoff in Leipzig zu 15 bis 40 Mk. Im Karlsruher Institut befindet sich ein kleiner Dampfwagen aus dem 18. Jahrhundert, getrieben durch ein mit Dampf angeblasenes Mühlrad, welches durch Zahnräder mit den Triebrädern verbunden ist. de Lavals Dampfturbinen (Fig. 3688) sind zu beziehen von der Maschinenbauanstalt


Fig. 3688.

Humboldt in Kalk bei Köln am Rhein, von drei Pferdekräften an, eventuell auf eisernem Stativ mit Vorgelege und langsam gehender Triebwelle. Die Dampfturbine von Parsons wird gebaut von der Firma C. A. Parsons u. Co. in Newcastle on Tyne; andere ähnliche Systeme von Brown, Boveri u. Co., Baden (Schweiz); Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Berlin; Gesellschaft für elektr. Industrie, Karlsruhe, u. a.

690. Reaktion. Auch die Reaktion bestimmt sich bei Gasen nach gleicher Formel wie bei Flüssigkeiten und kann durch dieselben Vorrichtungen gezeigt werden, z. B. mit einem kurzen, vertikal herabhängenden Schlauche (mit Einlage), welcher mit einem rechtwinklig umgebogenen Ausströmungsrohre versehen ist. So lange der Zufluß gering ist, strömt die Luft horizontal aus, dann neigt sich der Strahl immer mehr und bei einem bestimmten Druck wird er gerade senkrecht.

Welche unangenehmen Wirkungen die Reaktion hat, kann man mittels eines langen Schlauches mit Einlage zeigen, welcher mit winkelförmigem Ausströmungsrohre versehen wird. Läßt man stark komprimierte Luft aus demselben austreten, so führt er die merkwürdigsten Bewegungen aus, so daß es gefährlich ist, in die Nähe zu kommen.

Fig. 3689.

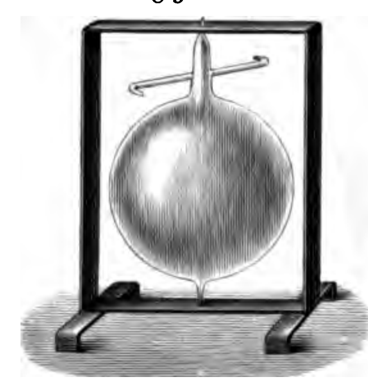


Fig. 3690.

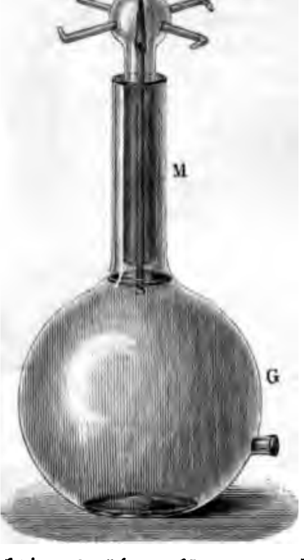
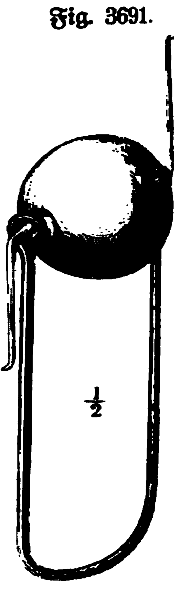


Fig. 3691.



Als Luft- und Dampfreaktionsräder können auch die für Reaktion von Wasserstrahlen dienenden Reaktionsräder und Springbrunnenmundstücke gebraucht werden.

Wird ein Gefäß mit Luftreaktionsrädchen (Fig. 3689 Lb, 3), bestehend aus einer um eine vertikale Achse drehbaren, sehr leichten Glaskugel, welche oben zwei seitliche Ausströmungsröhren mit nach entgegengesetzten Enden enthält, unter die Luftpumpe gebracht und evakuiert, so daß die Luft im Innern des Ballons sich ausdehnt und ausströmt, so gerät es in Rotation. Bei anderen Vorrichtungen dieser Art[1]) befindet sich das Rädchen an einer auf einer Spitze drehbaren engen und relativ langen Glasglocke, welche in Wasser eintaucht und von unten her durch eine Zuleitungsröhre, die durch das Wasser bis in die Glocke dringt, mit Leuchtgas gespeist wird (Fig. 3690 Lb, 4,50). Des lästigen Gasgeruches halber und um den Effekt zu erhöhen, zündet man die aus den Speichen des Rädchens austretenden Gasstrahlen an[2]).

Herons rotierende Kugel. Man bläst eine etwas große Kugel von Glas mit zwei Spitzen, die man durch einen Träger von Draht steckt und wie Fig. 3691 krümmt. Die Kugel wird erwärmt und dann durch Erkalten, indem man die eine Spitze mit dem Finger verschließt, eine kleine Portion Wasser hineingebracht. Bringt

[1]) E. Rousseau, Catal. des appar. etc. de l'expos. nat. de 1880, Bruxelles. —
[2]) Zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln. Preis 4,50 Mk.

man nun das Wasser über der Weingeistlampe unter langsamem Drehen der Kugel zum Sieden, so fängt diese durch den Rückstoß der ausströmenden Dämpfe rasch zu laufen an. Es ist gut, wenn man auch den Träger von Glas macht; in diesem Falle werden die Spitzen zuerst gebogen, dann der Träger aus zwei dünnen Glasstängelchen gemacht, diese an die Kugel gesteckt und nachher erst im Bogen zusammengeschmolzen.

Fig. 3692.



Eine vollkommenere Form zeigt Fig. 3692 (E, 35).

Schäffers Dampffähre (Fig. 3693) ist eine kleine, ganz aus Glas gearbeitete Vorrichtung, welche auf Wasser schwimmt und durch die Reaktion des ausströmenden Dampfes sich in gerader Richtung oder bei Anbringung eines Steuerruders auch kreisend fortbewegt[1]).

691. Die Kolbenmotoren sind als statische Maschinen schon früher, S. 984 und 1101, behandelt worden. Nimmt der Kolben Geschwindigkeit an, so werden die Verhältnisse komplizierter. Den einfachsten Fall eines solchen Motors stellen das Blasrohr und die Windbüchse dar. Abbildung und Beschreibung der letzteren folgt im XII. Kapitel. Auch Flinten und Kanonen können als derartige Motoren betrachtet werden, da durch Explosion des Pulvers zunächst stark komprimierte Gase entstehen. Eine Kanonenkugel werde in einem 2 m langen Lauf durch das entwickelte Gas mit einem Druck von 18000 kg bewegt, während ihr eigenes Gewicht nur 3 kg ist, so wird ihre Beschleunigung $G = \frac{9{,}81 . 18000}{3}$ $= 58860$, und weil sie nur durch den Raum von 2 m dieser Beschleunigung unterworfen ist, so erlangt sie nach der Formel $v^2 = 2gs$ eine Geschwindigkeit $v = \sqrt{2 . 58860 . 2} = 485$ m[2]). Die Zeit, die sie dazu braucht, ist nach der Gleichung $c = gt$ oder $t = \frac{c}{g}$ nur $\frac{485}{58860}$ Sekunden, oder sie verläßt den Lauf in $^1/_{121}$ Sekunde, nachdem das Pulver entzündet ist.

Fig. 3693.



692. Ventilatoren. Die Umkehrung der Windmühle ist der Ventilator[3]). Beim Unterrichte benutzt man kleine Ventilatoren, die sich auf der Schwungmaschine

[1]) Zu beziehen von Albert, Frankfurt a. M., zu 3,40 Mk. — [2]) Bei sehr großen Geschützen kommen Geschwindigkeiten von 725 m/sec und mehr vor. Flinten verschiedener Art liefert z. B. G. L. Rasch, Hofbüchsenmacher, Braunschweig. — [3]) Schraubenventilatoren nach Fig. 3694 liefert von 200 bis 2500 mm Flügeldurchmesser zu 27 Mk. bis 1320 Mk. C. Sonnenthal, Berlin C., Neue Promenade 6; ein Modell eines solchen als Aufsatz zur Schwungmaschine nach Fig. 3695 (Preis 12 Mk.) Leppin u. Masche, Berlin SO., Engelufer 17. Bei letzterem ist der entstehende Luftstrom bis auf 10 m Entfernung zu fühlen oder durch einen Bogen Seidenpapier nachzuweisen. Stellt man zu beiden Seiten des Motors Bunsenbrenner auf und hält einen dritten über den Motor, so ist an der Richtung der Flammen zu erkennen, wie die Luft von allen Seiten nach

befestigen lassen (S, 7,50). **Gerbing** (Arch. d. Pharm. [2] LXVIII, 281) konstruierte ein kleines derartiges Windradgebläse, welches sich zum Glasblasen eignen soll. Fig. 3698 (K, 67) zeigt ein zu gleichem Zwecke dienendes mit Turbine für Dampf- oder Wasserbetrieb, sowie mit Schnurlauf versehenes transportables Gasgebläse, welches ein Gemenge von Luft und Gas ansaugt.

Fig. 3694.



Fig. 3695.



Fig. 3696.

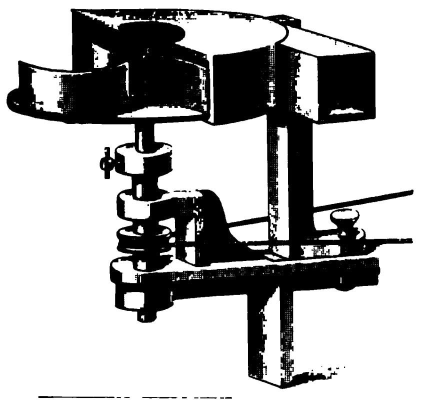
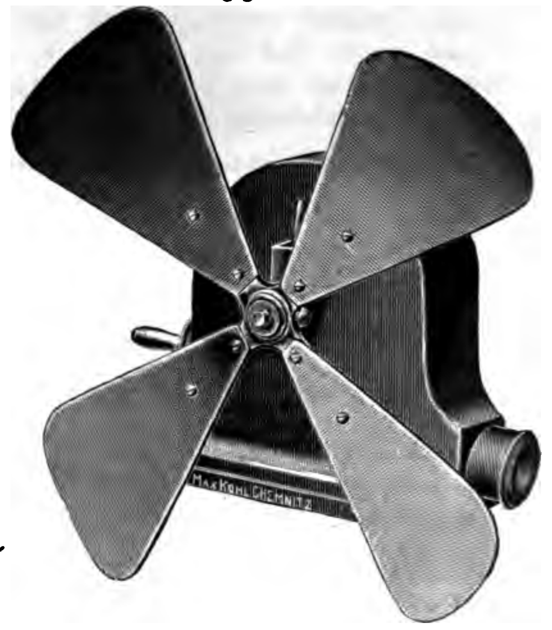


Fig. 3698.



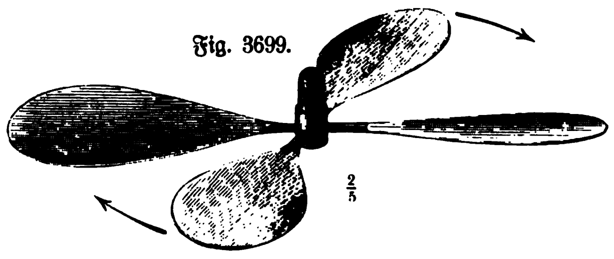
Fig. 3697.



dem Flügelsystem hingezogen wird. Die Saugwirkung auf der Rückseite ist ebenfalls durch einen Papierbogen nachweisbar. Setzt man die ganze Maschine auf eine Brückenwage, stellt ihr Gewicht ein (14,590 kg) und bringt den Ventilator dann wieder in Gang, so ist sofort die Gewichtsdifferenz (120 g) weithin sichtbar (Wirkung der **Luftschraube**). — Ein Modell eines **Schaufelradventilators** zeigt Fig. 3696 (Lb, 11) eine Verbindung von Wassermotor mit Ventilator Fig. 3697 (K, 55).

Größere Ventilatoren sind als Gebläse für Feldschmieden in Gebrauch, doch sind nicht alle rotierenden Gebläse an Feldschmieden Ventilatoren, sondern sehr häufig sind dies Gebläse nach Roots Konstruktion, bei welchen zwei ineinander zahnradartig eingreifende Holzkörper die Luft aus einer Öffnung ansaugen und durch eine andere hinausdrängen (Fig. 263, S. 134).

Eine Verbindung von Windrad mit Ventilator ist insofern von Interesse, als sie, ähnlich wie eine Verbindung von Wasserrad und Kreiselpumpe, als Transformator benutzt werden kann, um Luftströmung von großer Intensität und kleiner Geschwindigkeit in solche von geringer Intensität und großer Geschwindigkeit umzuwandeln oder umgekehrt.


Fig. 3699. 2/5

Ferner kann ein Ventilator in Verbindung mit einem Manometer, welches den erzeugten Winddruck mißt, ebenso wie eine Kreiselpumpe als Tachometer benutzt werden. Man kann die Skala des Manometers so aichen, daß sie direkt die Umdrehungszahl pro Sekunde angibt.

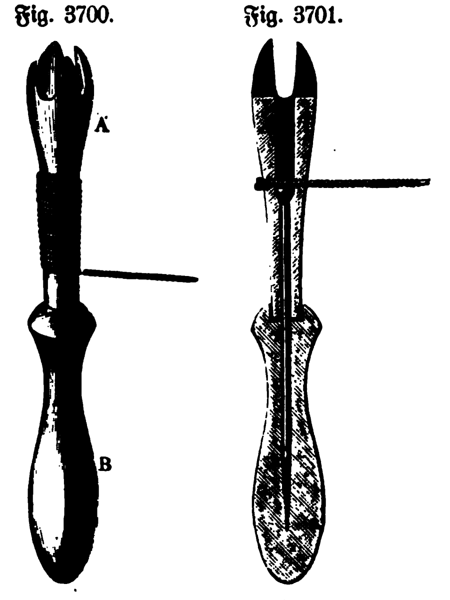


Fig. 3700. Fig. 3701.

693. Die Luftschraube. Ein lehrreiches Spielzeug, in gewissem Sinne eine Umkehrung der Windmühle, ist der Flieger in Fig. 3699. Er besteht aus einem Flügelrad mit vier schief gestellten Flügeln, die somit ein Stück einer viergängigen Schraube darstellen, ferner einer Drehvorrichtung mit Gabel am Ende, in welche nach Aufwickeln der Schnur das Flügelrad eingelegt wird (Fig. 3700 und 3701). Zieht man nun die Schnur ab, so kommt es ähnlich wie ein Kreisel in rasche Drehung und schraubt sich alsbald in die Luft hinauf bis zu ansehnlicher Höhe, im Zimmer bis zur Decke, wo es bleibt, bis die Drehungsgeschwindigkeit zu klein geworden ist, um die Wirkung der Schwere zu übertreffen.

Noch einfacher wird der Apparat so konstruiert, daß an Stelle des Flügelrades ein breiter S-förmiger Blechstreifen tritt, von dessen Enden das eine aufwärts, das andere abwärts gebogen ist. In der Mitte sind drei Löcher, mittels deren derselbe auf die dreizinkige Gabel des Drehapparates aufgesteckt wird. Infolge des scharfen Randes des Bleches können aber leicht Verletzungen eintreten [1]).

[1]) Hierher gehört der Schleuderapparat, welchen die Eisenwerke Gaggenau (bei Rastatt in Baden) liefern. (Preis 4 bis 12 Mk.) Der Apparat wiegt nur 800 g. Die Projektile bestehen aus poliertem Stahlblech und können nach allen Richtungen losgeschnellt werden. Einen Flieger mit starker Spiralfeder als Triebkraft liefern Dr. Houdek u. Hervert zu 10 fl.

Andere Formen zeigen die Fig. 3702 (K, 5), 3703, 3704 (K, 13,50) und 3705 (E, 22), die wohl ohne weiteres verständlich sind.

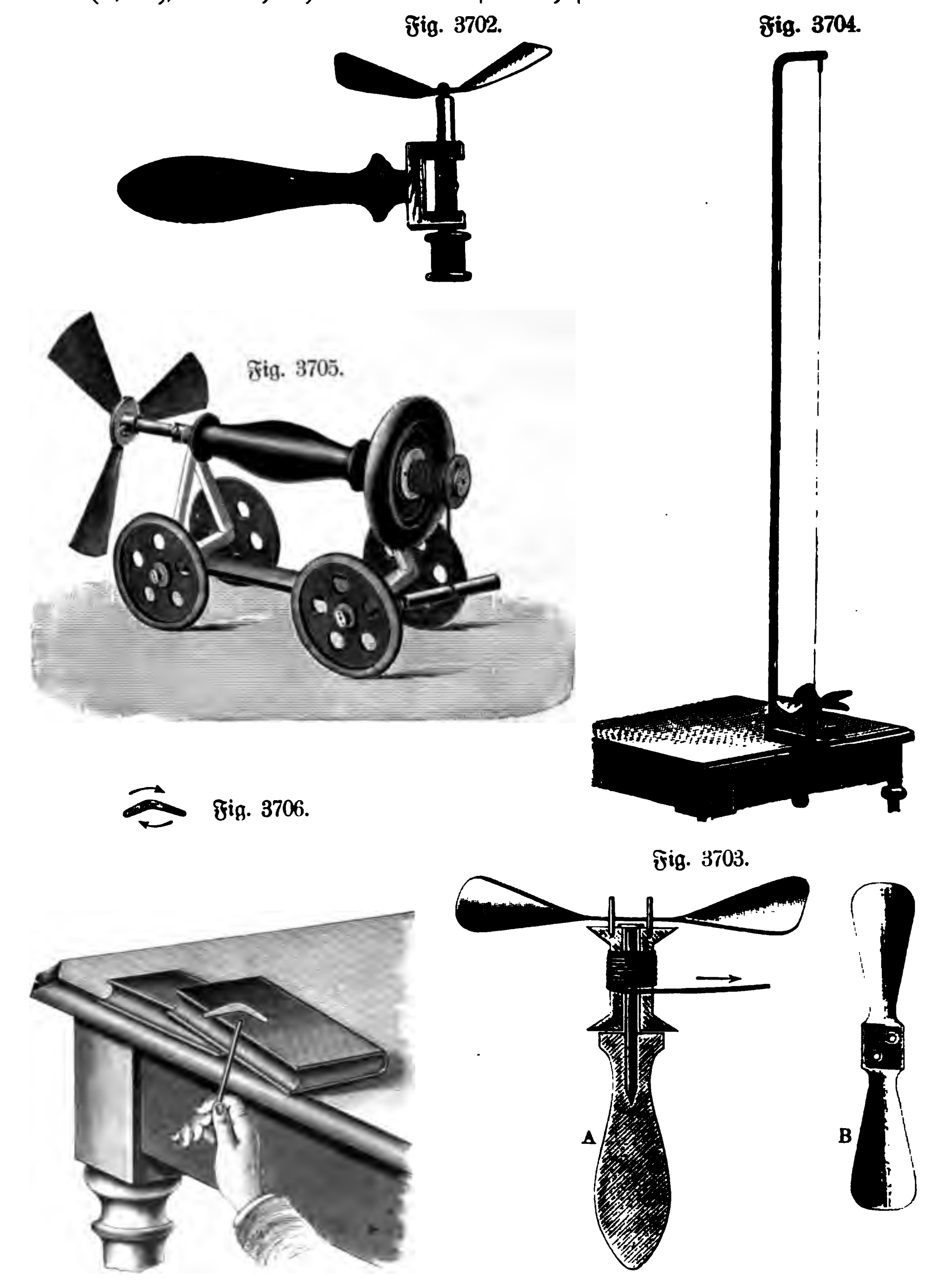


Fig. 3702. Fig. 3704. Fig. 3705. Fig. 3706. Fig. 3703.

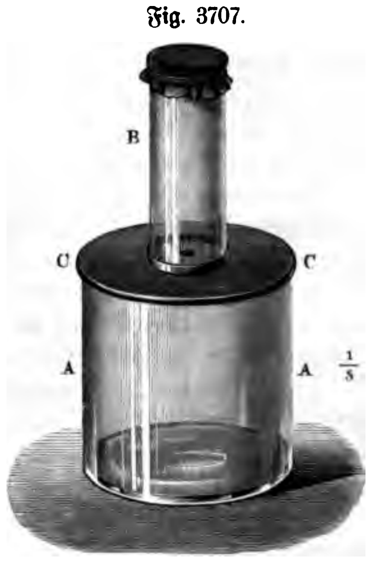
Hierher gehören auch der Bumerang[1]) (Fig. 3706), der Drache und die Flugmaschinen.

[1]) Über ein Modell desselben aus starkem Kartonpapier siehe Hopkins, Der praktische Experimentalphysiker, S. 71. Fig. 3706 stellt ein solches Modell dar nach Donath, Physikalisches Spielbuch.

Um dem Drachen Stabilität zu verleihen, ist bei der als Spielzeug benutzten Form ein Schwanz angebracht, welcher schwingende Bewegungen, die das Gleichgewicht der Kräfte stören und Herabfallen des Drachen bewirken könnten, dämpft. Bei den zu meteorologischen Zwecken verwendeten Drachen ist kein solcher Schwanz vorhanden, die Stabilität vielmehr dadurch erzielt, daß der Drachen die Form einer rechteckigen Röhre hat. Man kann mehrere Drachen übereinander anordnen, von welchen jeder den folgenden trägt. Auf diese Weise hat man Steighöhen bis 4000 m erreicht.

694. Wirbelringe. Reusch benutzte den Apparat Fig. 3707. Das Glasgefäß AA ist mit dem nur aufgelegten Deckel CC versehen, in dessen Mitte sich — in dünner Wand — eine kreisrunde Öffnung befindet; in einen niedrigen Ring des Deckels kann das oben mit Kautschuk zugebundene Rohr B gestellt werden. Das Rohr B wird nun mit Rauch gefüllt und auf die straffe Kautschukdecke ein momentaner oder länger dauernder Druck ausgeübt, wonach man dann im unteren Gefäße die Form der einströmenden Luft sehen kann. Ist der Deckel innerhalb der kurzen Hülse weiter ausgeschnitten, so kann man hier dünne Bleche mit verschiedenen Öffnungen einlegen.

Fig. 3707.



Will man nur die Rauchringe zeigen, so dient auch ein aus Papier würfelförmig zusammengeleimtes Gefäß, das man vorher durch die in einer Seite befindliche Öffnung mit Rauch füllt, wonach man auf die untere Seite mit dem Finger einen Stoß ausübt. Selbst aus Spielkarten kann man eine solche Vorrichtung zusammensetzen.

Einen anderen für gleiche Zwecke dienenden Apparat nach Weinhold zeigt Fig 3708. Er besteht aus einem großen Blechtrichter, über welchen man eine frische Schweins- oder Ochsenblase bindet und sie langsam trocknen läßt. Der Trichter wird an irgend ein Stativ befestigt. Schlägt man mit dem Finger gegen die Blase, so wirkt die aus dem engen Teile heraustretende Luftwelle noch auf eine 2 bis 3 m entfernte Kerzenflamme. Die Luftbewegung wird sichtbar, wenn man den Trichter vorher mit Rauch füllt und dieser bildet dann ebenfalls Ringe.

Fig. 3708.

Ball (1868) zeigt das Durchdringen von (unsichtbaren) Luftringen durch eine Rauchsäule in folgender Weise. Zwei Glaskolben, der eine Ammoniak, der andere Salzsäure enthaltend, werden auf Stativen so aufgestellt, daß ihre Öffnungen schief gegeneinander gerichtet sind und möglichst nahe nebeneinander liegen. Beide Kolben werden erhitzt bis zum Sieden der Flüssigkeiten, wodurch eine sehr dichte Säule von Salmiakrauch gebildet wird. 2 bis 3 m davon entfernt wird nun ein würfelförmiger Kasten von 60 cm Seitenlänge aufgestellt, dessen der Rauchsäule abgewandte Seite aus starker Leinwand gebildet ist, während die gegenüberliegende in der Mitte eine 24 cm weite Öffnung enthält. Wird nun ein Schlag auf die Leinwand gegeben und dadurch ein (unsicht-

barer) Luftwirbelring erzeugt, so sieht man, sobald dieser die Dampfsäule durchdringt, daß der Rauch nach innen und außen beiseite geschoben wird und das Aussehen von zwei konzentrischen Rauchringen erhält. Der Luftring nimmt die Rauchhüllen, durch welche er nun sichtbar wird, mit sich und schreitet im übrigen ungestört weiter.

Um das Fortschreiten von Rauchringen einem größeren Auditorium zu demonstrieren, empfiehlt Ball, den genannten Kasten durch Verbrennen von Phosphor mit Rauch zu füllen und 7 bis 10 m entfernt, gegenüber einer elektrischen Laterne, aufzustellen, so daß die Ringe in dem Lichtkegel des elektrischen Lichtes voranschreiten. Stellt man auch neben der Lampe einen dem ersten entgegengerichteten Kasten auf und erzeugt gleichzeitig mit jedem einen Rauchring, so kann man die Erscheinungen zeigen, welche beim Begegnen zweier Rauchringe eintreten.

Will man einen Wirbelring durch einen anderen durchtreiben, so ist, wie Dorn (1895) bemerkt, nötig, daß der zweite so rasch wie möglich nach dem ersten hervorgerufen werde. Bei dem von ihm benutzten Apparate (60 cm Seitenlänge, 15 cm Öffnung) mußte der zweite Schlag mit dem Klöppel so rasch, als es die Hand vermochte, nach dem ersten und zwar etwas kräftiger gegeben werden.

Sehr schöne Rauchringe entstehen auch beim Einwerfen von Calciumphosphid in ein Kelchglas mit Wasser infolge Selbstentzündung des sich bildenden Phosphorwasserstoffs. Wird die Wasseroberfläche mit einer 1 mm hohen Schicht von feinem trockenem Sägemehl oder Lykopodium bedeckt, so sammelt sich darunter das Gas in Gestalt einer Blase, die schließlich platzt, wobei auch das Sägemehl in großem Ring in die Höhe getrieben wird. (Nach Bleunard, Beibl. 24, 168, 1900.)

Bläst man mit Rauch eine Blase aus Glycerinflüssigkeit (S. 845), legt sie auf einen Ring und durchbohrt sie an der Kuppe, so wird die Rauchmasse vertikal in die Höhe geschleudert und breitet sich dann zu einer Art Regenschirm aus. Es beweist dies, daß die Blase sich während ihrer Zerstörung kontrahiert.

Wood (Z. 15, 351, 1902) benutzt als Luftstoßapparat einen Kasten aus Kiefernholz, der etwa 1 m lang, breit und hoch ist und an einer Seite eine Öffnung von 25 cm Durchmesser hat. Über die gegenüberliegende offene Seite sind in der Richtung der Diagonalen zwei starke Kautschukschläuche gespannt, außerdem ist diese Seite mit schwarzem Wachstuch bedeckt, das ziemlich lose angeheftet ist. Die Kautschukschläuche geben nach dem Ausstoßen eines Ringes den erforderlichen Rückstoß, so daß der Kasten sofort für einen zweiten Schuß bereit ist. Der Apparat liefert Luftringe von großer Energie, deren Anschlagen gegen die Wand des Lehrzimmers deutlich hörbar ist und dem Schall ähnelt, den ein Schlag mit einem Handtuch erzeugt. Schießt man die unsichtbaren Ringe in rascher Folge gegen die Gesichter der Zuhörer, so ruft das Auftreffen ähnliche Empfindungen hervor wie ein Schlag mit einem dichten Wattebausch [1]).

Die Energie der Luftringe zeigt man, indem man sie gegen eine flache Pappschachtel richtet, die man in einiger Entfernung von dem Stoßapparat aufstellt.

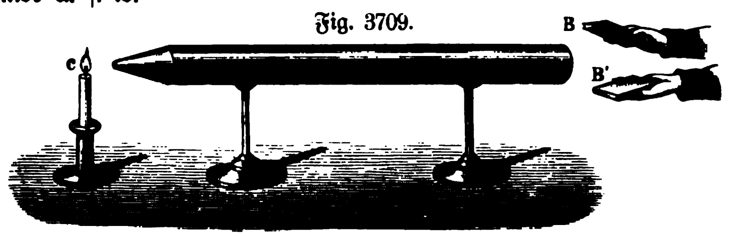
Bei der Benutzung eines Luftstoßapparats mit zwei Öffnungen beobachtete Wood das Zusammenfließen zweier Ringe, die sich nebeneinander bewegten, zu

[1]) Mächtige Luftwirbelringe, welche bis zu den Wolken aufsteigen, bilden sich beim Abschießen der „Wetterkanonen", d. h. kleiner Böller mit schlank konischem trichterförmigem Aufsatz (nach Stiger-Suschnig) zu beziehen von dem Eisenwerk St. Katharein a. d. Laming in Steiermark. Gewöhnliche Böller liefern z. B. die Deutschen Schießböllerwerke, Haslach in Baden.

einem einzigen großen Ring. Haben die Ringe eine große Drehgeschwindigkeit, so prallen sie voneinander ab, ist diese aber gering, so vereinigen sich beide.

Man kann hier weiter hinweisen auf die Auflösung eines Luftstrahles in Wirbel, rauchende Kamine, Dampfstrahlen, Rauch bei Geschützen, Windwogen [1]), Wirbelwinde u. s. w.

Fig. 3709.



695. Fortpflanzung von Luftstößen. Daß es sich hierbei ebenso wie bei den Wasserwellen neben der Bildung langsam fortschreitender Wirbelringe um Bildung rasch fortschreitender Verdichtungen, um eine fortschreitende Bewegung handelt, zeigt man am einfachsten durch eine etwa 1 m lange und 3 bis 5 cm weite, an einem Ende verengte Röhre (Fig. 3709), in deren weites Ende man Rauch bringt, worauf man durch Zusammenschlagen der Hände vor diesem Ende Schall erregt. Die Luftwelle übt wohl einen Einfluß auf eine am anderen Ende befindliche Lichtflamme, eventuell wird dieselbe durch die Verdichtung ausgelöscht, aber Rauch tritt hier keiner aus, auch erfolgt das Auslöschen sofort, nicht erst nach Ablauf der Zeit, die ein Wirbelring gebrauchen würde die Flamme zu erreichen.

Fig. 3710.



Fig. 3711.

Drentelen (1894) zeigt die Übertragung eines Stoßes durch die Luft mit zwei vertikalen, über Ringe gespannten Membranen, deren eine gestoßen wird, während die zweite den Stoß aufnimmt und dies dadurch kundgibt, daß sie ein kleines, an ihr anliegendes Pendelchen abstößt. Stellt man zwischen beide Membranen eine Kerzenflamme, so zeigt sich, daß der Stoß dieselbe durchdringt, ohne sie erheblich zu stören.

Looser benutzt ein Kundtsches Ventil (Fig. 3710) in Verbindung mit dem Manometer des Doppelthermoskops um die Existenz der Verdichtungswellen in der Luft nachzuweisen [2]).

Ein dickwandiges Messingrohr R ist an dem einen Ende schräg abgeschnitten und eben geschliffen. Ein mit einer Membran aus Fischblase oder Gummi glatt

[1]) Siehe auch Thiel u. Abegg, Z. 16, 96, 1903. Siehe ferner O. Lehmann, Molekularphysik 2, S. 374. — [2]) Zu beziehen von Max Kohl in Chemnitz. Fig. 3711 K, 18, zeigt ein Kundtsches Ventil nach Rostowzew, welches durch Drehen des Hahns sowohl als Druck-, wie als Saugventil zu gebrauchen ist. (Siehe auch § 704, S. 1483.)

überzogenes Metallrähmchen *M* hängt an zwei Ösen so, daß es durch eine regulierbare schwache Feder glatt aufliegt. Dieses Rohr ist durch einen Gummipfropf (von der inneren Seite) geführt, welche in ein Glasgefäß *G* gesteckt wird, das mit einem Röhrchen *r* für den Manometerschlauch und mit einem Ansatzrohr *a* zum Einstellen in das Rohr eines Schlittens oder des Fußbrettes versehen ist. Auf das hervorragende Ende des Messingrohres wird ein Schalltrichter gesetzt.

Stellt man diesem einen Weinholdschen Luftstoßapparat in 5 bis 6 m Entfernung gegenüber, so genügen einige mäßige Schläge auf die Hinterwand desselben, um die Säule des Manometers mehrere Centimeter hoch zu heben.

Das Ventil muß gut schließen, d. h. bläst man, bei entferntem Schalltrichter, in das Rohr, so muß die Flüssigkeitssäule steigen und stehen bleiben oder doch nur langsam sinken.

696. Sensitive Flamme. Hierzu ist ein Brenner mit etwa 2 mm weiter Öffnung nötig, aus welchem eine etwa 60 cm hohe schmale ruhige Flamme brennt. Der gewöhnliche Druck des Leuchtgases ist hierzu nicht zureichend. Man füllt dieses deshalb zunächst in einen Kautschuksack, wie er für Kalklicht benutzt wird oder einen

Fig. 3712.

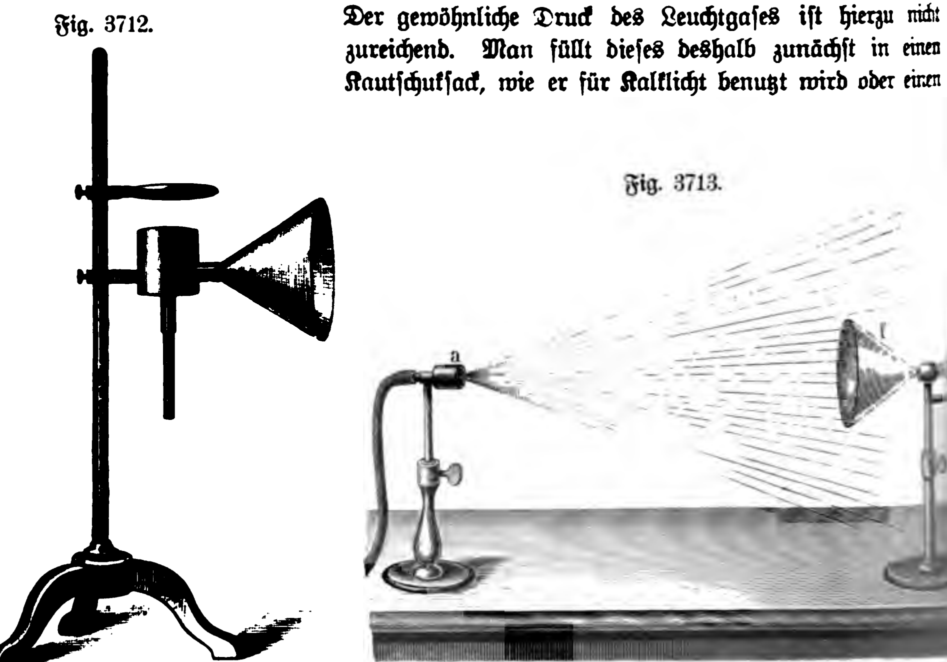


Fig. 3713.

Glockengasometer, und verbindet nun diesen, nachdem er gefüllt ist, mit dem Bren[ner]. Durch Auflegen von Gewichten (beim Gasometer durch Wasserbelastung, S. 97[3]) läßt sich leicht der Druck so weit steigern, daß die nötige Flammenhöhe erreicht wird. Zu dem Versuche ist größte Ruhe im Lehrsaale nötig, da schon bei ganz schwachen Geräuschen die Flamme beunruhigt wird. Bei stärkerem Geräusch schrickt sie zusammen, wird breit und rauschend[1]). (Fig. 3714 E, 6,50; 3715 K, 40; 3716 Lb, 9[illegible].

[1]) Max Kohl in Chemnitz liefert einen Brenner für sensitive Flammen (nach König), welcher schon bei einem Gasdruck von 35 mm sicher funktioniert, zu 18 Mk. (Fig. 3712). Siehe auch Brandstätter (Z. 8, 163, 1895) u. Burton (Z. 16, 290, 1903). Ernecke, Berlin, liefert den in Fig. 3713 dargestellten Apparat nach Tyndall, wobei die Luftstöße durch eine schwingende Zunge hervorgebracht und der empfindlichen Flamme durch einen Gastrichter zugeleitet werden, zu 33,5 Mk.

Richtet man den Apparat, Fig. 3708, gegen eine sensitive Flamme, so zuckt diese zuerst infolge des mit Schallgeschwindigkeit fortschreitenden Stoßes und dann nochmals, wenn sie von dem Rauchring (Luftring) getroffen wird. Zum Schlagen dient zweckmäßig ein an einem Stiele befestigter Gummiball.

Neyreneuf (1882) verwendet einen gewöhnlichen Bunsenschen Brenner mit geschlossenen Luftlöchern, welcher so reguliert wird, daß die Flamme zurückschlägt und halb oben, halb unten brennt. Durch einen Ton erregt, vereinigen sich die obere und untere Flamme. Das Brennerrohr wird durch umgeleitetes Wasser kalt gehalten.

Nach W. Schwalbe und R. Lüpke (1890) kommt es für das Gelingen des Versuches darauf an, daß die Flamme das Innere des Brenners von der Ausströmungsmündung an, wie es beim Durchschlagen des Brenners stattfindet, ganz erfüllt, an einer Seite aber von der Wandung des Schornsteins (der Röhre) abgedrängt ist. „Es gelingt dies leicht, indem man ein etwas feinmaschiges

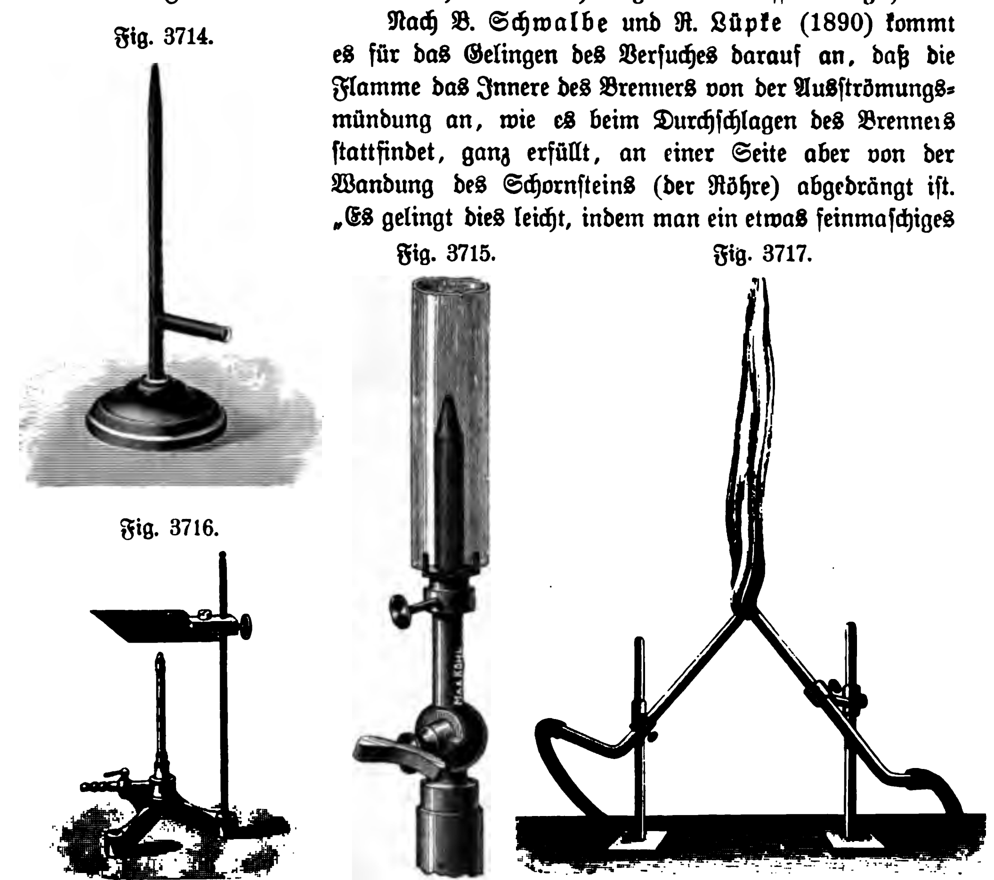


Fig. 3714. Fig. 3715. Fig. 3716. Fig. 3717.

Drahtnetz (ein 3 bis $3^1/_2$ cm langes Stück) zusammenwickelt und in den Schornstein des Brenners schiebt, bis genau oberhalb der Gasausströmungsöffnung."

Dieselben Autoren empfehlen folgendes Verfahren:

Zwei 5 bis 10 mm weite Glasröhren werden kapillar ausgezogen, unter nahezu rechtem Winkel, wie in Fig. 3717 gegen einander in Stative eingeklemmt und mit der Gasleitung verbunden. Die beiden Flammen (einzeln $2^1/_2$ bis 5 dm hoch) stoßen zusammen und bilden eine einzige rauschende Flamme, wenn man die Mündungen auf 3 bis 5 mm Abstand nähert. Die meisten dieser Flammen reagieren sehr lebhaft auf die Vokallaute a, e, i, während sie bei o und u sich ruhig verhalten.

Rebenstorff erhielt eine große, sehr empfindliche Flamme durch folgendes Verfahren. Man füllt einen Trockenturm mit Watte, die mit einem Gemisch von

Äther und Benzin getränkt ist, leitet die Luft eines Wassergebläses bei passend geringer Öffnung des Lufthahnes hindurch und entzündet die aus einer zugespitzten Röhre austretenden Gase jenseits eines Drahtnetzes. Die von dem Wassergebläse erzeugten Luftwellen stören nicht, sie werden durch die Watte vernichtet. Die Einwirkung der Luftwellen erfolgt hauptsächlich durch Vermittelung der festen Teile (Tisch, Trockenturm, Röhre).

697. **Luftwellen.** Durch regelmäßig schwingende Körper wie longitudinal geriebene Stäbe, Stimmgabeln, Membranen u. s. w., aber auch ganz von selbst wie bei Zungenpfeifen, singenden Flammen[1]) u. s. w. können regelmäßige Folgen von Verdichtungs- und Verdünnungs-Wellen entstehen.

Eine meßbare Zahl von Stößen (Verdichtungen) pro Sekunde erhält man bei der Sirene.

Am einfachsten bringt man Längsschwingungen mit einer etwa 1 cm weiten Glasröhre hervor, indem man dieselbe in der Mitte mit zwei Fingern senkrecht hält und dann die eine Hälfte mit einem nassen wollenen Lappen der Länge nach gelinde reibt. So lange die Glasröhre tönt, zeigt sich ihre nasse Oberfläche gekräuselt. Am reinsten schwingt die Glasröhre, wenn man mit dem Lappen rasch über sie hinaus fährt. Nimmt man hölzerne oder metallene Stäbe, so muß man entweder den wollenen Lappen mit Kolophonium bestreuen oder eine kurze Glasröhre daran kitten, die man dann mit dem nassen Lappen reibt. Durch verschieden starkes Reiben kann man verschieden rasche, im Verhältnis von 1, 2, 3 u. s. w. stehende Schwingungen hervorbringen, doch gelingt es nicht bei allen Glasröhren u. s. w. mit gleicher Leichtigkeit.

Die entstehenden intensiven Töne geben Anlaß, darauf hinzuweisen, daß die Luftwellen von uns direkt mittels eines besonderen Organs, des Ohrs, empfunden werden können, aber nicht als rasch wechselnde Verdichtungen und Verdünnungen, sondern als Schall, ähnlich wie wir den Bewegungszustand der Moleküle nicht als rasche Folge einzelner Stöße, sondern als Wärme empfinden. Es empfiehlt sich indes nicht, wie es gewöhnlich in Lehrbüchern geschieht, nun ohne weiteres Luftwellen und Schall zu identifizieren, vielmehr muß die Existenz der Luftwellen, die Art ihrer Ausbreitung u. s. w. zunächst unabhängig von der Schallempfindung nachgewiesen und verfolgt werden. Später, wenn die dafür erforderlichen feineren Methoden besprochen sind, wird dann näher zu untersuchen sein, ob die Schallempfindung stets den physikalischen Vorgängen parallel geht, oder ob unser Gehörorgan mehr oder weniger unzuverlässig ist und welche weiteren von der Art der Funktion unserer Nerven abhängigen Momente neben den physikalischen Vorgängen bezüglich der Schallwahrnehmung in Betracht kommen. Diese Fragen bilden den Gegenstand des Kapitels „Akustik“ in Band II.

Stimmgabeln erhält man bei den Eisenhändlern um sehr billige Preise von verschiedener Güte, allein von sehr abweichender Stimmung. Man wählt solche aus, welche auf einem Resonanzboden einen vollen Ton geben, denselben lange, ohne zu steigen, aushalten und nahezu auf a' gestimmt sind. Man bedarf deren mindestens zwei, wovon man eine nach einer anderen aus zuverlässiger Hand geliehenen auf a' abstimmt, die zweite aber dann so richtet, daß sie mit der ersteren etwa vier Stöße in der Sekunde macht. Das Stimmen dieser Gabeln geschieht

[1]) Siehe hierüber namentlich Rebenstorff, Z. 15, 274, 1902.

durch Befeilen; sind sie zu tief, so verkürzt man ihre beiden Schenkel, sind sie zu hoch, so macht man sie durch Befeilen von der inneren Seite dünner. Man muß dabei beide Schenkel möglichst gleich halten. Um die Gabel tiefer zu machen, kann man dieselbe auch auf der inneren Seite des Verbindungsbogens befeilen.

Fig. 3718.



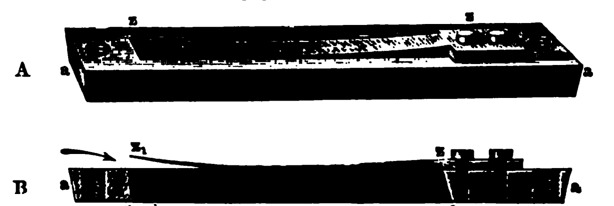
Fig. 3718 zeigt ein Etui mit verschiedenen Stimmgabeln, zu beziehen von Leybolds Nachf. in Köln, Fig. 3719 (Lb, 8) eine Normalstimmgabel $a' = 435$ Schwingungen, Modell der physikalisch-technischen Reichsanstalt, von welcher Stimmgabeln auch geprüft, mit Stempel und Beglaubigungsschein versehen werden.

Fig. 3719.



Zum Tönen bringt man die Gabeln entweder dadurch, daß man sie am Stiele leicht hält, den einen Zinken gegen ein Holz schlägt und dann, wenn erforderlich, mit dem Stiele auf einen Tisch oder einen Resonanzboden fest aufsetzt, oder indem man sie in der Ebene beider Zinken und nahe am Ende derselben mit einem gut geharzten Geigenbogen streicht oder auch mit einem kleinen hölzernen Hammer, dessen scharfe Bahn mit hartem Leder beleimt ist, anschlägt; bei dem letzteren Verfahren erhält man den Ton der Gabel sehr rein.

Fig. 3720.



Läßt man Stimmgabeln anfertigen, etwa für den später folgenden Versuch mit dem Kästchen, so wird dazu Gußstahl genommen, weil dieser das gleichförmigste Material bietet; sie werden nicht gehärtet. Man gibt den Zinken 1/4 der Breite zur Dicke und nimmt sie überhaupt stärker als die käuflichen; für a' kann man die Breite der Zinken — senkrecht zur Schwingungsebene — bis 1 cm nehmen.

Zungen auf Rahmen, welche beim Durchblasen von Luft in Vibration kommen, kann man jeder Kindertrompete oder Mundharmonika entnehmen. Fig. 3720 zeigt in *A* eine perspektivische, in *B* eine Durchschnittsansicht einer solchen Zunge *zz* nebst dem Rahmen *aa*, auf welchem sie befestigt ist. Die Pfeile in Fig. *B* zeigen den Weg des Luftstromes und die äußersten Stellungen der Zunge z_1 und z_2.

Die Zunge stellt ein Federpendel mit Elastizität und Trägheit — letztere oft durch aufgelötetes Blei vergrößert — dar, dessen Schwingungen durch die Luftstöße zu immer größerer Stärke angeregt werden, bis die durch die Dämpfung bedingte Grenze erreicht ist.

Eine singende Flamme ist eine empfindliche Flamme, welche durch ihre Schwingungen selbst Töne erzeugt, welche sie fortgesetzt aufs neue erregen, so daß sie, einmal erregt, fortfährt zu tönen. Dabei ist unter Umständen schon der geringste Anlaß genügend, die Schwingungen hervorzurufen, d. h. die Flamme beginnt von selbst zu tönen.

Nach B. Schwalbe und R. Lüpke (1890) können die in Fig. 3717 dargestellten Flammen auch als selbsttönende verwendet werden, wenn man die Ausströmungsöffnungen auf $1^1/_2$ bis $2^1/_2$ mm verengt, so daß die Flammenhöhe nur $1^1/_2$ bis 2 dm beträgt.

Nach W. Holtz (Z. 6, 280, 1893) ist die günstigste Weite der Brenneröffnungen 0,75 mm.

Fig. 3721.

Um sich eine Sirene selbst herzustellen, schraubt man auf die Achse der Zentrifugalmaschine ein Stück Holz *aa*, Fig. 3721, welches selbst auf seiner oberen Fläche eine hölzerne Schraube trägt, über die man in der Mitte durchlöcherte Pappscheiben streifen und durch die hölzerne Mutter *bb* befestigen kann. Diese Pappscheiben müssen sehr eben sein und erhalten in geringer Entfernung vom Umkreise gleichförmig darauf verteilte runde Löcher von 3 bis 5 mm Durchmesser mittels eines gewöhnlichen Durchschlages; man kann auf derselben Scheibe eine zweite und dritte Reihe einschlagen, immer aber müssen die Zwischenräume nur um weniges größer sein als die Löcher. Zinkscheiben mit gebohrten Löchern sind freilich besser, machen aber mehr Arbeit. Das Ebenrichten wird man vom Klempner machen lassen (Fig. 3722).

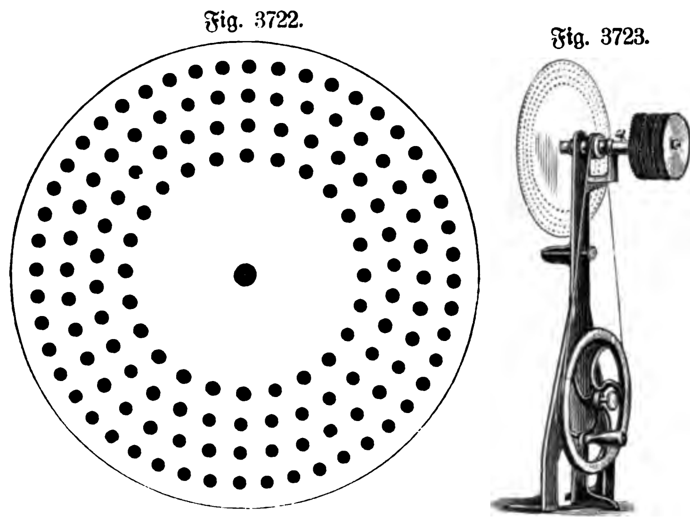


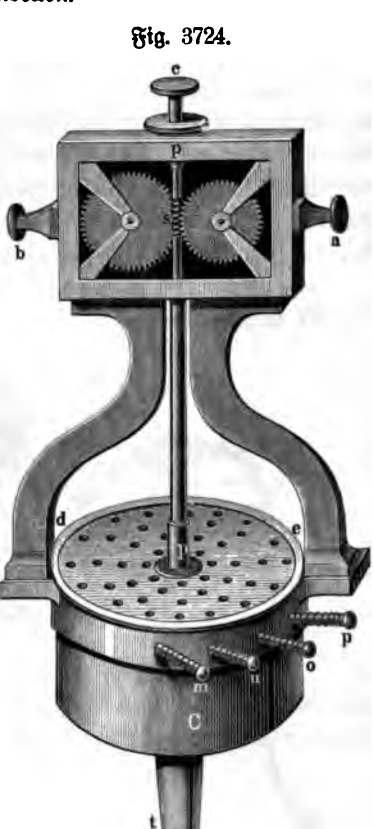
Fig. 3722. Fig. 3723.

Man bläst durch eine zugespitzte Glasröhre, deren Öffnung jedenfalls kleiner ist, als die Weite der Löcher in der Scheibe; eine Öffnung von 2 mm genügt. Man kann nacheinander die einzelnen Löcherkreise anblasen. Zweckmäßig ist es, die Zahlen der Löcher so zu wählen, daß sie die harmonischen Töne geben.

Savarts Sirene ist eine Zusammenstellung von Zahnrädern mit verschiedener Teilung, auf die Schwungmaschine aufgesetzt (Fig. 3723 K, 9). Hält man gegen ein umlaufendes Rad ein Kartenblatt, so wird es durch die Stöße der Zähne in entsprechende Vibration gebracht und erzeugt Luftwellen.

Wesentlich vollkommener ist die in Fig. 3724 abgebildete Sirene mit Zählwerk nach Dove (K, 110). Die an der Achse *p* befestigte Messingscheibe *de* ist in vier Reihen mit 8, 10, 12 und 16 Löchern schief durchbohrt. Unter ihr befindet sich eine feste Scheibe mit korrespondierenden, entgegengesetzt schief gebohrten Löchern, welche den Deckel der Büchse *C* bildet. Die spitzen Enden der Achse drehen sich sehr leicht in ihren Lagern, deren oberes durch die Schraube *c* mit Gegenmutter *p* gebildet wird. Eine Schraube ohne Ende an der Achse greift in ein Zählwerk ein, welches sich durch Drücken an den Knöpfen *a* und *b* beliebig ein- und ausschalten läßt. *t* ist das Rohr zur Luftzuführung und *m, n, o, p* sind Schieber, welche gestatten, die Luft zur einen oder anderen Löcherreihe zutreten zu lassen.

Fig. 3724.



Als Zeitmesser dient eines der früher beschriebenen Sekundenpendel. Durch Veränderung des Gewichtes auf dem Blasebalge kann man die Sirene auf einen beliebigen Ton bringen und nach Belieben darauf erhalten. Bezüglich der Tonstärke ist zu bemerken, daß bei der eigentlichen Sirene der Ton durch die vereinte Wirkung aller Öffnungen hervorgebracht wird, wodurch auch tiefere Töne klar werden. Wenn nur ein Rohr gegen die Öffnungen eines Rades bläst, so werden tiefere Töne zu schwach und von dem unvermeidlichen Zischen verdeckt. Hohe Töne gibt jede Sirene mit der erforderlichen Bestimmtheit. Bei den Versuchen mit der Sirene muß man entweder einen etwas großen Blasebalg verwenden (s. S. 133) oder auf andere Weise die Stöße des Schöpfers vermindern, weil man sonst keine so konstanten Töne erhält, daß man Messungen machen kann. Am einfachsten nimmt man eine Rinderblase, welche man an ein in die Windleitung eingeschaltetes Rohr mit rechtwinkligem Ansatz, wie Fig. 3725, anbindet und mittels eines Brettchens durch Gewicht beschwert. Auch dadurch, daß man eine Flasche einschaltet, wird der Wind gleichmäßiger. Da jedoch die Windstärke auch von dem Zuge der Blasebalgfalten ab-

Fig. 3725.



hängt, so muß man beim Schöpfen darauf sehen, den Balg immer gleich voll zu halten. Besser wäre freilich Wind aus einem anderen Gebläse, z. B. aus der Gasometerleitung (S. 132).

Stern (Z. 10, 260, 1897) benutzt einen Windkessel mit Druckpumpe, welche durch ein Schwungrad betrieben wird. Der Druck beträgt 3 bis 6 Atm. (S. 130).

Sehr oft sind die Scheiben der Sirenen auch zu leicht und darum für die Stöße und das Einrücken des Zählwerks empfindlicher; macht man dieselben aber schwerer, so ist der geringe Druck nicht im stande, höhere Töne hervorzubringen. Der Verfasser hat bei Stöhrer in Leipzig eine Sirene machen lassen, welche statt der Löcher zahlreiche feine Schlitze und eine schwerere Scheibe hat, sie gibt ohne Zischen selbst die allertiefsten Töne und ist für die Stöße sehr unempfindlich, sowie für das Einschalten des Zählwerkes.

Um den Ton der Sirene rasch zu regulieren, empfiehlt Bourbouze (1879), dieselbe zwischen Elektromagnetpole zu bringen, welche infolge der Induktion dämpfend auf die Bewegung der rotierenden Scheibe einwirken.

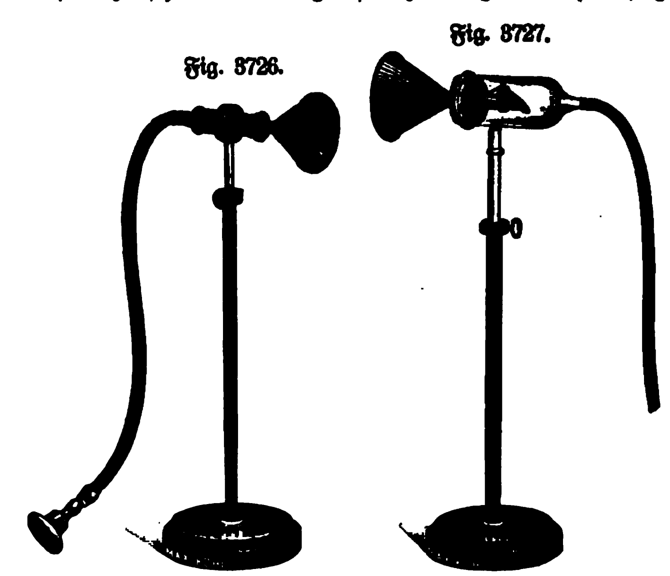


Fig. 3726. Fig. 3727.

Fig. 3726 (K, 10) zeigt eine Pfeife für Demonstrationen, Fig. 3727 (K, 12) ein dazu passendes Kundtsches Ventil, welches mit einem Manometer von Kolbes Doppelthermoskop zu verbinden ist, zum Nachweis der Wellen.

Am bequemsten zur Ausführung von Versuchen über Luftwellen sind die verschiedenen Arten von Pfeifen.

Am besten dürfte eine Zungenpfeife geeignet sein, deren Wirkung sich unmittelbar an die der Stimmgabel anschließt, somit leicht zu erklären ist, während die Erklärung der Lippenpfeife die Besprechung der Resonanz voraussetzt.

Vor der Stimmgabel hat die Zungenpfeife den Vorzug, daß sie konstante Wellen erzeugt, während die Schwingungen der Stimmgabel durch die Wellenerregung rasch gedämpft werden. Der Vorgang ist analog der Erzeugung von Longitudinalwellen bei einer Spiralfeder.

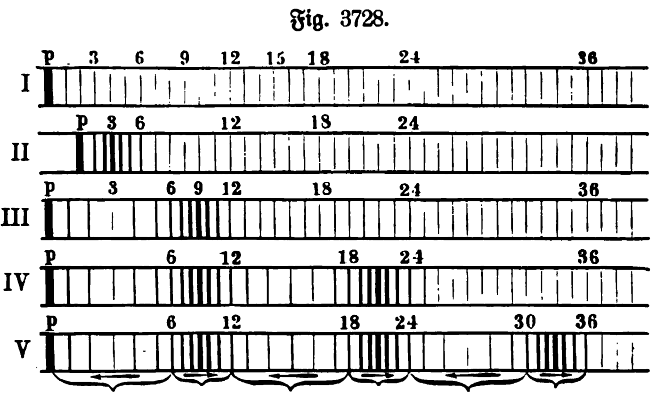
Wird das Ende einer langen Spiralfeder oder Luftsäule, Fig. 3728, durch Verschiebung eines Kolbens p zusammengedrückt, so geht bei Rückwärtsbewegung des Kolbens die aufgespeicherte potentielle Energie[1]) nicht wieder vollständig in kinetische Energie über, sondern nur ein Teil, während der andere Teil als Energie der Verdichtungswelle in den Raum hinaus fortschreitet (Fig. 3728, I und II). Der Kolben braucht deshalb nicht bis in die Anfangslage zurückzukehren, wenn der auf

[1]) Bei der Luft ist es in Wirklichkeit Wärme.

ihn wirkende Druck verschwinden, d. h. die angrenzende Partie des Feldes ihre Verdichtung verlieren soll. Wird der Kolben über diese neue Gleichgewichtslage hinaus in die anfängliche Ruhelage bewegt, so entsteht, wie Fig. 3728 III zeigt, in gleicher Weise eine in den Raum hinauseilende Verdünnungswelle und von der Energie derselben geht bei Rückbewegung des Kolbens in die neue Ruhelage wieder nur ein Teil an den Kolben als Bewegungsenergie zurück, der Rest stellt die Energie der Strahlung dar.

Wiederholt sich die Bewegung des Kolbens rhythmisch, so entstehen Wellenzüge, wie sie die Fig. 3728 IV und V andeuten, doch werden die Amplituden der Wellen, eben weil immer nur ein Teil der Energie dem schwingenden Kolben zurückerstattet wird, immer geringer, bis schließlich die Schwingungen ganz erlöschen. Man sagt, die Schwingungen des Kolbens werden durch die Strahlung „gedämpft".

Fig. 3728.



Die Energie des schwingenden Kolbens (die Summe der kinetischen und potentiellen Energie) ist in jedem Moment, wenn s das spezifische Gewicht, also $\frac{s}{g}$ die Dichte des Kolbens in Hyl pro Cubikdecimeter und v das Volumen desselben in Cubikdecimetern, a die Amplitude in Metern und T die Dauer einer ganzen Schwingung in Sekunden bedeuten, gleich der Bewegungsenergie in dem Momente, wenn die Geschwindigkeit ihren größten Wert hat, also:

$$A = \frac{1}{2g} \cdot s v \cdot \left(\frac{2 . \pi . a}{T}\right)^2 \text{ Kilogrammeter}^{1)}.$$

Die Energie der ausgesandten Wellenbewegung pro Cubikmeter beträgt, falls es sich um eine Wellenbewegung in einem homogenen elastischen Medium oder in Luft handelt,

$$J = \frac{1}{2} \cdot \varrho \cdot \left(\frac{2 . \pi . a}{T}\right)^2 \text{ Kilogrammeter},$$

wobei ϱ die Dichte des Gases in Hyl pro Cubikmeter und a wieder die Amplitude in Metern bezeichnet.

Wäre beispielsweise das Gewicht des Kolbens $= 1$ kg, somit die Masse $= \frac{s . v}{g} = \frac{1}{9{,}81}$ Hyl, die Amplitude desselben $= 0{,}046$ mm und die Schwingungszahl pro Sekunde 435, somit $T = \frac{1}{435}$, so wäre die Energie

$$A = \frac{2 . 3{,}14^2 . 0{,}046^2 . 10^{-6} . 435^2}{9{,}81} = 8 . 10^{-4} \text{ Kilogrammeter}.$$

---

[1]) Die Größe $\frac{2\pi . a}{T}$ ist die Geschwindigkeit eines gleichförmig im Kreise umlaufenden Körpers, als dessen Projektion der schwingende Körper erscheint. Vgl. Fig. 3335, S. 1301.

Dicht an der Fläche des Kolbens ist die Energie der Luftbewegung pro Cubikmeter, wenn das Gewicht dieses Luftquantums = 1,29 kg gesetzt werden kann, also die Dichte $\varrho = \frac{1,29}{9,81}$ Hyl pro Cubikmeter:

$$J = \frac{1,29 \,.\, 2 \,.\, 0,046^2 \,.\, 10^{-6} \,.\, 3,14^2 \,.\, 435^2}{9,81} = 10,3 \,.\, 10^{-4} \text{ Kilogrammeter.}$$

Wird als Schallgeschwindigkeit 340 m angenommen, so wäre die von dem schwingenden Kolben in einer Sekunde ausgesandte Energie, falls keine Dämpfung der Schwingungen stattfände und der Kolbenquerschnitt = 0,04 qm wäre:

$$J = 0,04 \,.\, 340 \,.\, 10,3 \,.\, 10^{-4} = 0,014 \text{ Kilogrammeter.}$$

Da nun aber der Kolben überhaupt nur $8 \,.\, 10^{-4}$ Kilogrammeter Energie enthält, könnte er, wenn die Schwingungen stets in gleicher Stärke andauern und nicht allmählich abklingen würden, nur $\frac{8 \,.\, 10^{-4}}{0,014} = 0,057$ Sekunden lang fortschwingen, falls ihm nicht die in Form von Luftwellen ausgestrahlte Energie beständig wieder ersetzt würde.

Die pro Sekunde von einer gewöhnlichen Stimmgabel ausgestrahlte Energiemenge beträgt etwa 3 milliontel Kilogrammeter pro Sekunde. Man bezeichnet dies als die Gesamtstrahlung, denjenigen Teil derselben, der durch eine Fläche von 1 qm senkrecht hindurchgeht, als die Intensität der Strahlung. Diese ist umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung, da dieselbe Energiemenge, die in 1 m Entfernung vom Oscillator durch 1 qm hindurchgeht, z. B. in 2 m Entfernung sich auf die Fläche 4 qm verteilt, so daß auf 1 qm nur ein Viertel der früheren Menge kommt. In sehr großer Entfernung vom Oscillator sind die Strahlen nahezu parallel. Die in der Sekunde durch 1 qm hindurchgehende Strahlung erfüllt also einen prismatischen Raum von etwa 340 m Länge und in 1 cbm ist eine Energiemenge enthalten gleich dem 340. Teil der Strahlungsintensität. Beispielsweise ist die Strahlungsintensität der obigen Stimmgabel in 10 m Entfernung: $\frac{3 \,.\, 10^{-6}}{4\pi \,.\, 100}$ Kilogrammeter pro Quadratmeter und die Energie pro Cubikmeter

$$= \frac{3 \,.\, 10^{-6}}{4\pi \,.\, 100 \,.\, 340} = 0,79 \,.\, 10^{-11} \text{ Kilogrammeter.}$$

Ist die Schwingungszahl = 435 pro Sekunde und das Gewicht von 1 cbm Luft = 1,2 kg, so beträgt dieselbe auch (nach obigem): $2\pi^2 \cdot \frac{1,2}{9,81} \cdot a^2 \cdot 435^2$. Durch Gleichsetzung beider Ausdrücke folgt $a = 0,79 \,.\, 10^{-3}$ m = 0,79 mm als Größe der Amplitude der Luftteilchen in 10 m Entfernung von der Stimmgabel.

Der experimentelle Nachweis des Gesetzes der Abnahme der Intensität mit der Entfernung würde einen Raum ohne Wände, Decke und Boden voraussetzen.

698. **Empfindliche Wasserstrahlen.** Läßt man einen dünnen Wasserstrahl, welcher sich in Tropfen zerteilt, schief aufsteigen, so daß er parabolische Form annimmt, so kann nach Tyndall die Empfindlichkeit gegen Luftwellen schön demonstriert werden. Bei einem Versuche zerspaltete sich der Strahl am Scheitelpunkte der Parabel in einen mehr als einen Zoll breiten Perlenregen (Fig. 3729); wurde nun aber eine Stimmgabel von 512 Schwingungen in der Sekunde angestrichen, so zog sich der Strahl alsbald zu einem scheinbar ununterbrochenen Bogen zu-

sammen (Fig. 3730). Durch geeignete Abänderung des Versuches konnte man auch zwei Strahlen wie Fig. 3731 erhalten. Sehr schön gestalteten sich die Erscheinungen bei intermittierender Beleuchtung durch die Funken eines mit einer Leidener Flasche verbundenen Induktionsapparates. Ertönten gleichzeitig zwei Stimmgabeln, welche Schwebungen erzeugten, so trat diesen entsprechend bei dem Strahl abwechselnd Streuung und Sammlung der Tropfen ein. E. Bauer (1886) empfiehlt einen Wasserstrahl, welcher aus einer Öffnung von etwa 1 mm (ausgezogene Glasröhre) austritt. Ein solcher ist gegen bestimmte Töne sehr empfindlich und gestattet fast ebenso überraschende Experimente wie empfindliche Flammen. (Projektion.)

Fig. 3729.

Fig. 3730.

Fig. 3731.

699. Resonanz. In einfacher Weise kann die Existenz der Luftwellen erkannt werden durch ihre Fähigkeit, einen anderen Körper mit gleicher Eigenschwingungsdauer (Resonator) in Mitschwingung zu versetzen. Würde beispielsweise die Wellenbewegung erregt durch eine Stimmgabel, so kann als Resonator eine gleich beschaffene Stimmgabel dienen, wobei sich nachweisen läßt, daß sie wirklich in Mitschwingung kommt, dadurch, daß man ein kleines Pendelchen daneben aufhängt, welches sie gerade eben berührt (Fig. 3732 Lb, 30) und um so heftiger fortgestoßen wird, je stärker die Schwingungen erfolgen.


Fig. 3733.


Fig. 3732.

Wird die Luftbewegung durch eine Klangscheibe erregt, so dient als Resonator eine zweite gleiche Klangscheibe, deren Schwingungszustand natürlich durch aufgestreuten Sand nachgewiesen wird (Fig. 3733 Lb, 28).

Mikola (Z. 17, 211, 1904) gibt folgenden Versuch an. Man nimmt ein Stück Kork, steckt in dasselbe drei Nadeln oder Zündhölzer und bildet so eine Art Dreifuß. Wird dieser Dreifuß auf die Platte gesetzt, so tanzt er so lange wie die Platte schwingt[1]). Man kann also die Dauer der Schwingungen bestimmen. Es wird sich herausstellen, daß die Platte ohne Resonanz zwei- bis dreimal so lange schwingt als mit Resonanz. Man wird sogar den Unterschied zwischen breiten und engen Röhren sehen können.

700. Phonautograph. Ein sehr einfaches Mittel um nicht nur die Existenz von Luftwellen, sondern auch annähernd deren Form nachzuweisen ist das, daß man sie einer gespannten Membran zuleitet, welche nach Art einer schreibenden Stimmgabel mit einer Schreibspitze versehen ist, die auf einer rotierenden, mit berußtem Papier überzogenen Trommel Wellenlinien aufzeichnet. Ist die Membran aperiodisch gedämpft, so können ihr alle möglichen Schwingungen aufgezwungen werden. Ist dies nicht der Fall, so werden ihre Eigenschwingungen durch Resonanz verstärkt; indes ist die Zahl der möglichen Schwingungen eine außerordentlich große, ähnlich wie bei Klangscheiben. (Siehe Antolik, Verh. d. Ver. f. Natur- u. Heilkunde 14, Preßburg 1903.) Ein Apparat, welcher hierzu dient, ist der Phonautograph, Fig. 3734 (Lb, 500) oder Membranschreiber.

Fig. 3734.



Bei dem Tonograph von Curtis ist eine Art gekrümmtes Ofenrohr an dem kürzeren vertikalen Schenkel mit einer dünnen elastischen Kautschukmembran von 15 cm Durchmesser überspannt, welche gleichmäßig mit einem Gemisch von getrocknetem Kochsalz und feinem Schmirgel bestreut wird, welches natürlich Klangfiguren bildet, sobald die Membran in Schwingung versetzt wird[2]).

701. Absorption der Luftwellen. Da eine mitschwingende Platte oder Membran einen Teil der Energie der Luftwellen aufnimmt und durch Wirkung der Reibung in Wärme umsetzt, werden die Luftwellen hierdurch gedämpft oder absorbiert. Gleiches gilt von einem Aggregat solcher Teilchen, welche eine absorbierende Schicht bilden. Ist nach Durchbringung einer Schicht von 1 m Dicke die Intensität $= k$. der Anfangsintensität, das Erregungszentrum in weiter Ferne angenommen, so wird sie nach Durchbringung von n Metern nur noch das k^n fache

[1]) In Spielwarenhandlungen erhält man kleine auf Schweinsborsten gesetzte Puppen, die sich ebenfalls eignen. — [2]) Siehe auch Weiler, Z. 9, 184, 1896.

des Anfangswertes. k heißt der Absorptionskoeffizient. Zur Messung können die Resonanzwirkungen benutzt werden[1]).

702. Strahlbildung und Beugung. Beim Durchgang der Luftwellen durch eine Öffnung in einer undurchlässigen Wand zeigen sich Strahlbildung und Beugung wie bei Wasserwellen. Zum Nachweis können ebenfalls Resonatoren gebraucht werden.

703. Intensität der Luftwellen. Edisons Phonometer. Der Apparat zeigt recht auffällig die Umwandlung von Wellenbewegung in rotierende Bewegung. Ein trichterförmiges Mundstück ist durch eine Membran abgeschlossen. Unter Vermittelung eines Stückchens Kautschukschlauch legt sich auf diese eine Feder, welche somit, falls die Membran durch Luftwellen in Schwingungen versetzt wird, ebenfalls mitschwingt. Da sie nun aber durch einen Sperrzahn auf ein schiefgezahntes Zahnrad einwirkt, dessen Zähne eine der Schwingungsweite der Feder entsprechende Breite haben, so wird bei jeder Schwingung dieses Zahnrad um einen Zahn gedreht und somit, da die Schwingungen rasch aufeinander folgen, in dauernde Rotation versetzt. Ganz ähnlich konstruiert ist der Phonomotor von Hartmann (1882). Mit dem Zahnrad ist vermittelst Überführungsschnur ein zweites, sich langsamer, aber mit größerer Kraft drehendes Rad verbunden.

Davis (Z. 16, 36, 1903) macht darauf aufmerksam, daß die Umdrehungsrichtung eines gewöhnlichen Schalenanemometers unabhängig von der Windrichtung ist und daß es daher auch hin und her gehende Luftströme wie in Orgelpfeifen anzeigt. Man ist somit im stande, mittels eines solchen Instrumentes die Amplitude der Luftwellen zu messen. Er fand sie in einem Falle = 3 mm[2]).

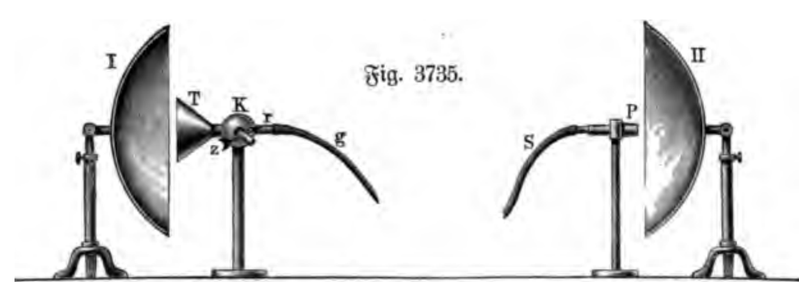


Fig. 3735.

704. Reflexion und Brechung der Luftwellen. Auch in diesem Falle dient zum Nachweis der Luftstöße nach Trussewitsch und Looser ein Kundtsches Ventil. Dasselbe ist so eingerichtet, daß das durch eine Membran aus Fischblase gebildete Klappenventil sich innerhalb eines dicken konischen Hahnes befindet. Durch Drehung des Hahnes um 180° kann das Ventil als Druck- oder Saugventil verwandt werden. Ein mit dem Griff des Hahnes fest verbundener Zeiger Z gibt die Richtung an, in der sich die Klappe öffnet. Die Kugel K trägt an der einen Seite

[1]) Siehe Sieveking und Behm, Ann. d. Phys. 15, 793, 1905. — [2]) Siehe auch Altberg, Ann. d. Phys. 11, 405, 1903. Derselbe bestimmte die Druckkräfte mittels eines Wienschen Manometers und fand Drucke von 0,2 milliontel Atm. und Energiemengen von 0,02 PS bei einem longitudinal schwingenden Glasstab. Über den mechanischen Wirkungsgrad der Schallerzeugung siehe Webster, Boltzmann-Festschrift, S. 866. Derselbe beträgt für die menschliche Stimme und musikalische Instrumente höchstens $1/_{100}$, für die Geige nur $1/_{2000}$ (bei der Frequenz 256). Zehn Millionen Hornbläser sind erforderlich, um 1 PS Tonwert zu erzeugen.

den Schalltrichter T und an der anderen das Rohr r, welches mit dem Manometer verbunden wird. Stellt man den Schalltrichter in den Brennpunkt eines Hohlspiegels I und eine zur Membran abgestimmte Pfeife P in den Brennpunkt des anderen Hohlspiegels II, dessen optische Achse mit der des ersten zusammenfällt (Abstand 1,5 bis 2 m), und bläst mit Hilfe eines angesetzten Gummischlauches S die Pfeife stark an, so bemerkt man — je nach der Stellung der Klappe — ein Steigen oder Sinken der Flüssigkeitssäule des Manometers um 5 bis 8 cm (Fig. 3735)[1].

Die Knoten, welche bei Reflexion der Luftwellen an einer ebenen Wand durch Bildung stehender Wellen erzeugt werden, lassen sich nach **Rayleigh** (1886) mittels einer sensiblen Flamme nachweisen, da diese wohl durch die Bäuche, nicht aber durch die Knoten beeinflußt wird.

Fig. 3736.



Mach benutzt zur Demonstration der Reflexion von Luftwellen die Entladungen einer Leidener Flasche, um Stöße in der Luft zu erzeugen, und macht die Wellen durch feines Kieselsäurepulver sichtbar. **Guthrie** gibt dem Apparate die Form einer flachen elliptischen, mit Glas bedeckten, innen sorgfältig polierten Mulde, in welche ganz trockene Kieselsäure eingebracht wird. Läßt man nun in einem Brennpunkte der Ellipse die Funken überschlagen, so ordnet sich die Kieselsäure um den anderen Fokus in feinen Rippungen.

Zum Nachweis der Brechung des Schalles dient die Linse Fig. 3736 (E, 33).

705. **Fortleitung in Röhren.** **Mach** verwendet zum Sichtbarmachen der Luftwellen, bei Ankunft am entfernteren Ende einer Rohrleitung, ein kleines Ölflämmchen, durch dessen Docht ein spitz zulaufendes Glasrohr aufsteigt. Erregt man am weiteren Ende dieser Glasröhre Schwingungen, so bläst das enge Luft in die Flamme oder saugt die Flamme ein, dieselbe kommt deshalb in entsprechende Schwingungen.

Töpler (1886) benutzt eine etwa 100 m lange Leitung von Messingrohr von 15 mm Weite, welches in Windungen ohne scharfe Knicke an der Wand des Vorbereitungszimmers hin und her geführt ist, die Zwischenwand durchdringt und am Experimentiertisch endigt. Eine Luftwelle wird dadurch erzeugt, daß man an das eine Rohrende einen Kautschukballon anstreift und denselben rasch zusammendrückt. Beim Loslassen entsteht eine Verdünnungswelle. Wann die Welle am anderen Ende ankommt, wird durch ein kleines Gasflämmchen von 15 bis 18 mm Höhe angezeigt, gegen dessen Mitte die feine Öffnung eines Blaseröhrchens gerichtet ist, welches mit dem Ende der Rohrleitung in Verbindung steht. (Ein solcher Flammen-

[1] Der Apparat ist zu beziehen von **Max Kohl** in Chemnitz. (Vgl. Fig. 3711, S. 1471.)

zeiger zeigt nur Verdichtungswellen an, indem solche eine blaue Lötrohrflamme erzeugen.) Ein gleicher Zeiger ist auch am Anfange der Rohrleitung angebracht, welcher durch den Gummiball abgeschlossen ist, so daß die zurückkommenden Wellen reflektiert werden. Man sieht nach Erregung einer Welle die Zeiger in großer Regelmäßigkeit etwa neunmal in Tätigkeit kommen, so daß es leicht ist, einen Taktmesser so abzustimmen, daß auf jeden Schlag eine Zuckung einer Flamme kommt. Daraus findet sich dann leicht die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle. Man kann auch nur Verdichtungs- oder nur Verdünnungsstöße fortschreiten lassen, indem man im ersten Falle den Gummiball nach dem Zusammendrücken festhält, im anderen ihn zunächst zusammendrückt und nach einiger Zeit, wenn Ruhe eingetreten ist, plötzlich aufschnellen läßt. Ist das entgegengesetzte Rohrende offen, so wird eine Verdichtungswelle als Verdünnungswelle reflektiert und umgekehrt. Infolgedessen zuckt die am Anfange befindliche Flamme nun nur bei den Schlägen 0, 4 und 8 des Taktmessers, weil bei den Schlägen 2 und 6 die Welle als Verdünnungswelle zurückkehrt. Die andere Flamme bleibt aus diesem Grunde ganz in Ruhe. Die Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit der Natur des Gases läßt sich dadurch demonstrieren, daß man die Röhre mit Kohlensäure füllt.

Halsch (1886) bediente sich zu gleichem Zwecke einer 43 m langen, 2,4 cm weiten Röhre mit Membranschreibern (siehe Phonautograph, S. 1482), deren Membranen die Stöße entweder auf eine rotierende Trommel aufzeichneten oder durch Bewegung eines langen Zeigers direkt sichtbar machten. Zum Erregen der Luftwellen dienten elektrisch entzündete Häufchen von Knallsilber. Violle (1887) experimentierte mit einem 20 m langen, 4 bis 5 cm weiten Zinkrohr, in welches eine kleine Salonpistole abgeschossen wurde. Zur Zeitbestimmung verzeichnete an dieselbe Trommel eine schreibende Stimmgabel ihre Schwingungen.

706. Geschwindigkeit der Luftwellen. Da die Fortpflanzung der Luftwellen analog ist der von Longitudinalwellen in einer Drahtspirale, könnte man vermuten, daß auch ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich nach derselben Formel bestimmt. Es müßte also sein $v = \sqrt{\frac{p}{d}}$, wobei p den Elastizitätsmodul (für die Gase durch den Druck dargestellt) und d die Dichte bedeutet. Im Normalzustande ist $p = 1033 \cdot 981$ Dynen pro Quadratcentimeter und für Luft $d = 0{,}001\,293$ g pro Cubikcentimeter. Hiernach würde sich ergeben $v = 280$ m/sec. In Wirklichkeit ist die Geschwindigkeit $\sqrt{1{,}405}$ mal größer, nämlich 332 m/sec in freier Luft, weil noch die in § 481 besprochenen Temperaturänderungen in Betracht gezogen werden müssen. In trockener Luft von t^0 ist $v = 331 \cdot \sqrt{1 + 0{,}003\,67 \cdot t}$ m pro Sekunde. In engen Röhren ist v etwas kleiner als in freier Luft infolge der Reibung an den Rohrwänden.

707. Kundts Figuren. Die Existenz stehender Luftwellen kann man bei Glasröhren sehr schön nach der Methode von Kundt zur Anschauung bringen, Fig. 3737. Eine lange, weite Glasröhre cd wird innen möglichst sorgfältig gereinigt und getrocknet, und nachdem etwas Lykopodium hineingebracht und durch Drehen und Schütteln gleichmäßig verteilt war, horizontal am Rande der Tischfläche durch Schraubzwingen mit Rohrklemmen befestigt. In das eine Ende c wird ferner mittels eines Korkes eine engere Glasröhre so eingesetzt, daß sie die weitere

nirgends berührt und zur Hälfte hinein-, zur Hälfte hinausragt. An der inneren Hälfte ist ein dünnes Kartonscheibchen, ein Kork oder dergl. mit Siegellack befestigt, um als Kolben auf die Luft in der weiteren Röhre wirken zu können. Das andere Ende *d* wird durch einen Kork mit angekittetem Griff *ms* verschlossen. Reibt man nun die enge Glasröhre mit einem nassen Tuchlappen der Länge nach hin und her, so gerät diese in lebhafte longitudinale Schwingungen und somit wird auch die Luft in der Röhre in stehende Schwingungen versetzt. An den Schwingungsbäuchen wird durch das Hin- und Herströmen der Luft der Lykopodiumstaub weggewischt, an den Knotenstellen dagegen sammelt er sich an und so entstehen dann hübsche Staubfiguren, aus deren Länge die Länge einer stehenden Luftwelle direkt erkannt werden kann. Man verschiebt den Kolben *ms* so lange, bis die Figuren am schärfsten werden, d. h. wenn die Länge der schwingenden Luftsäule gerade ein ganzes Vielfaches der Entfernung zwischen zwei Knotenpunkten (halbe Wellenlänge) ist (Fig. 3738). Um die Erscheinungen auch in verdünnter Luft und anderen Gasen beobachten zu können, erhält die weitere Röhre zweckmäßig zwei Ansatzröhrchen mit Hähnen zur Verbindung mit der Luftpumpe und mit dem Gasometer (Fig. 3739 Lb, 33).

Fig. 3737.

Ein eigentümliches Verhalten beobachtete Kundt bei sehr feinem Kieselsäurepulver. Um solches zu erhalten, wurde Kieselfluorgas durch Quecksilber in Wasser geleitet, die erhaltene Kieselsäure geglüht, zerrieben und durch ein

Fig. 3738.

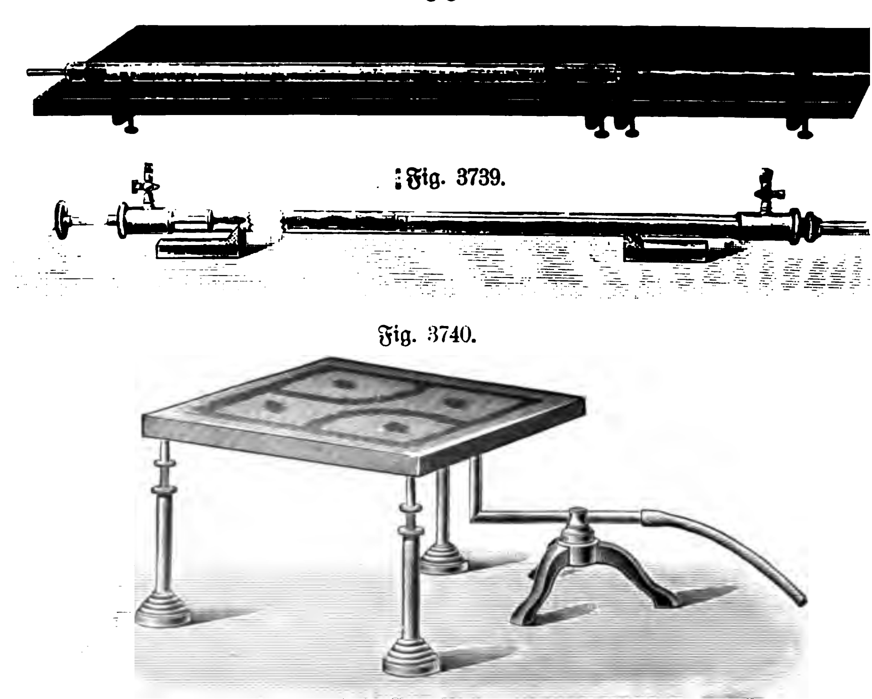


Fig. 3739.

Fig. 3740.

feines Gewebe gesiebt. Solches Pulver sammelt sich nicht an den Knotenpunkten an, wie Lykopodium, sondern wirbelt in der Röhre auf und bildet dünne Schichten, die zuweilen lebhaft erinnern an die Schichtungen des Lichtes in Geißlerschen

Röhren. Steht der Apparat genau horizontal, so stehen sie still, ist er indessen geneigt, so wandern sie dem tieferliegenden Ende zu bis zu den Knotenpunkten. Die einzelnen Schichten sind fast papierdünn und nehmen zuweilen den halben Querschnitt der Röhre ein [1].

Fig. 3741.

Sehr schön zeigt sich die Bewegung der Luft auch, wenn man die Öffnung einer 2 bis 10 cm weiten und 1 bis 2 m langen (anderseits offenen oder geschlossenen) Glasröhre mit einer Kautschukmembran straff überbindet, nachdem man in die Röhre eine dünne Lage von Korkfeilspänen gebracht hat. Man setzt auf die Kautschukmembran ein einerseits ebengeschliffenes Glasrohr von höchstens 1 cm Durchmesser und 1 dm Länge und bläst stark hinein, während man das weite Rohr horizontal hält. Die Korkspäne lagern sich in schmalen Streifen zwischen den Knoten und zwar besonders schön während des Tönens [2].

Fig. 3742.



Ferner kann man die Schwingungen erregen dadurch, daß man die Röhre mit Korkstaub durch einen Schlauch mit einer Orgelpfeife verbindet, und zwar so, daß der Schlauch an einem Knotenpunkte in der Wand der Pfeife mündet.

Als Wellenerreger kann auch an das eine Ende der Kundtschen Röhre statt des Glasstabes eine Lockpfeife [3] angebracht werden.

Um aus der in einer Röhre von d mm Weite gefundenen halben Wellenlänge l die entsprechende in freier Luft zu erhalten, muß man $0{,}02 \,.\, l^{3/2}/d$ mm addieren.

Erzeugt man mit demselben Glasstabe Staubfiguren in zwei Röhren, von welchen die eine mit einem anderen Gas gefüllt ist, und beträgt der Knotenabstand in diesem l bei der Temperatur t^0, während er in Luft l' bei t'^0 ist, so ist für das Gas

$$v = 331 \,\frac{l}{l'} \sqrt{\frac{1 + 0{,}003\,67 \,.\, t'}{1 + 0{,}003\,67 \,.\, t}} \text{ m/sec.}$$

Ist der Stab in der Mitte eingeklemmt, beträgt seine Länge L (d. h. die Länge der halben stehenden Welle im Stabe) und der Knotenabstand in Luft l, so ist v für den Stab

$$v = 331 \,.\, \sqrt{1 + 0{,}004 \,.\, t} \cdot \frac{L}{l} \text{ m/sec.}$$

---

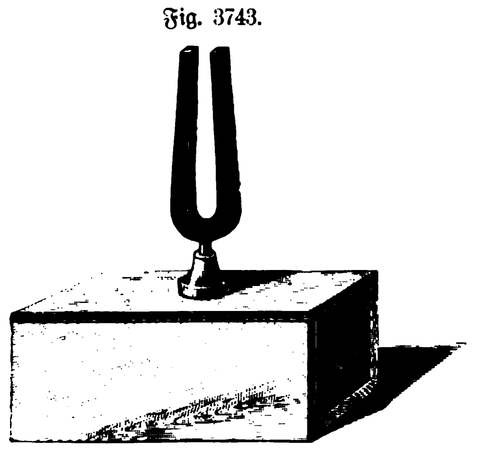
[1]) Über einen Apparat zur Erklärung dieser Schichtenbildung nach König s. Fig. 3781, S. 1504. — [2]) Daß die Membran durch das Anblasen in Schwingungen kommt, kann durch den Apparat Fig. 3740 (Lb, 35) nachgewiesen werden, wobei der Schwingungszustand durch aufgestreuten Sand nachgewiesen wird. — [3]) Eine Galtonpfeife zur Erzeugung sehr großer Schwingungszahlen (bis 170000 ganze Schwingungen pro Sekunde), nebst dazu passendem Apparat für Kundtsche Staubfiguren (Fig. 3741 und 3742) liefert zum Preise von 53 Mk. das Edelmannsche Institut in München. S. Ann. d. Phys. 2, 469, 190.

Hieraus berechnet sich der **Elastizitätsmodul** des Stabes $E = \frac{v^2 . s}{9810}$ kg pro Quadratmillimeter, wenn s sein spezifisches Gewicht ist. F. **Kohlrausch** gibt folgendes Beispiel: Die Länge L eines Glasstabes war 900 mm, $t = 17°$, $l = 62{,}9$ mm. Hieraus folgt $v = 4890$ m/sec, somit, da $s = 2{,}7$ war, $E = 6580$ kg pro Quadratmillimeter. Längere Stäbe klemmt man ein Viertel vom Ende ein. Dann ist statt L natürlich $L/2$ zu setzen.

Luftplatten. Eine offene schwingende Luftplatte erhält man nach **Kundt** dadurch, daß man auf den Rand einer Glasscheibe gleich hohe Korkstückchen aufkittet und eine zweite gleichgeformte Glasplatte darauf legt. Letztere ist in der Mitte durchbohrt und mit einer senkrecht aufgesetzten Glasröhre verkittet, in welcher man mittels eines eingeschobenen, im Stopfen befestigten Glasstabes ebenso wie bei Erzeugung der eben besprochenen Staubfiguren Longitudinalwellen erregt. Die Figuren bilden sich durch Aufwirbeln des auf die untere Glasplatte aufgestreuten Korkpulvers. Ersetzt man die die beiden Platten trennenden Korksäulchen durch einen geschlossenen, mit Leder oder Tuch überklebten Rahmen, so erhält man eine geschlossene Luftplatte. Es ist nötig, durch Probieren (durch Abbrechen kleiner Teile) den schallerregenden Glasstab auf solche Länge zu bringen, daß er einen der Töne der Luftplatte erzeugt, was der Fall ist, sobald auf die obere Glasplatte aufgestreutes Pulver sich zu regelmäßigen Figuren ordnet.

708. Oscillatoren mit Resonator. Die Wirkung eines Oscillators, welcher für sich nur schwache Luftwellen erregt, kann bedeutend gesteigert werden durch Kombination mit einem **Resonator**, welcher die Energie gewissermaßen in sich aufspeichert und durch **Summation** der einzelnen Impulse befähigt wird, nunmehr selbst wesentlich stärkere Verdichtungen und Verdünnungen zu erzeugen als der ursprüngliche Oscillator. Auch wenn dies nicht der Fall ist, kann der Resonator dadurch die Wirkung verstärken, daß er mit weit größerer Fläche auf die Luft einwirkt als der Oscillator allein.

Fig. 3743.



Aus diesem Grunde werden gewöhnlich die **Stimmgabeln** mit einem Resonanzkasten verbunden, wie Fig. 3743 zeigt.

Damit die Stimmgabel die volle Wirkung gebe, genügt es (nach **Dvorschak**) nicht, daß der Ton der Luftmasse (Luftton) des Kästchens mit dem der Stimmgabel übereinstimme, sondern es muß auch der Eigenton des Holzes, der Holzton, damit in Einklang sein, was sich durch Abhobeln erzielen läßt. Das Kästchen erhält vier Füße aus Kautschukschlauchstückchen, welche der Länge, nicht der Quere nach angeleimt werden.

Nach A. **Springer** (1891) soll sich auch Aluminium zu Resonanzkästen eignen.

Sehr auffallend zeigt sich die Verstärkung der Wirkung durch Resonanz bei den singenden Flammen.

709. Die chemische Harmonika. Zu diesem Versuche kann man einen Wasserstoffentwickelungsapparat mit weitem Boden, wie *A*, Fig. 3744, verwenden. Das hervorströmende Gas muß eine mindestens 6 mm lange Flamme bilden; dann erst hält man eine 4 bis 6 cm weite, 6 bis 12 dm lange Glasröhre über die Röhre *B* und sucht durch Heben und Senken der weiten Röhre die Stelle, wo der kräftigste Ton entsteht. Mit Leuchtgas und mit engeren Röhren kann der Versuch ebenfalls gemacht werden (Fig. 3745 Lb, 10,50 und Fig. 3746 Lb, 50). Oft gelingt es, die Röhre zum Tönen zu bringen, wenn man den ihr entsprechenden Ton in der Nähe kräftig hervorruft — sie z. B. ansingt.

Man kann auch eine Papprӧhre in die Glasröhre stecken und durch Verschieben derselben während des Tönens die Tonhöhe ändern.

Wenn man über einen Ring des Retortengestelles ein Drahttuch spannt und dann etwa 8 bis 10 cm unter dem Tuche einen Spitzbrenner anbringt und das Leuchtgas erst oberhalb des Drahttuches an-

Fig. 3744.

Fig. 3745.

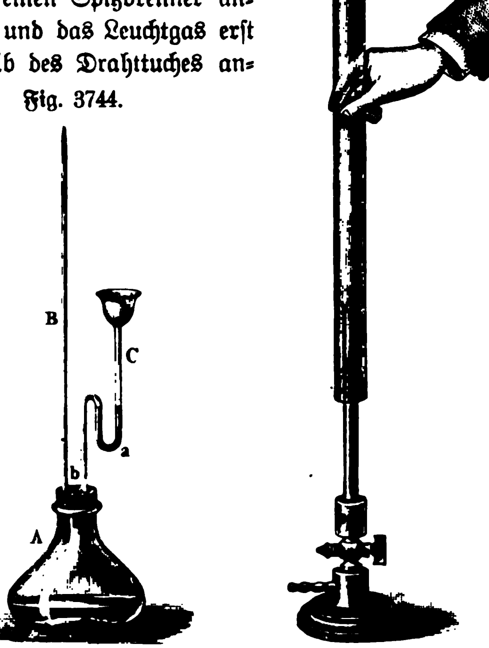


Fig. 3746.



zündet, sodann über die Flamme eine mäßig weite Röhre stellt, so soll die Flamme sehr empfindlich sein für sehr scharfe Geräusche. Entfernt man aber das Drahttuch weiter von dem Brenner, so wird die Flamme kleiner und fängt zuletzt an zu singen; geht man jetzt wieder mit dem Drahttuch herunter, bis die Flamme zu singen aufhört, so fängt sie bei jedem Geräusch wieder an zu singen und singt, so lange das Geräusch dauert.

Sehr laute und kräftige Orgeltöne kann man mit einer 2 bis 3 m langen Blechröhre erhalten, in welche man einen besonders großen und hohen Bunsenschen Brenner einführt. Der Brenner muß mit einem halbkugelförmigen Drahtnetz bedeckt werden. Schrille hohe Töne gibt ein gewöhnlicher Auerbrenner, wenn man ihn etwas über den Bunsenbrenner emporhebt (vgl. Akustik).

Kundt bringt in der Röhre zwei Flammen an, welche unter einem Winkel gegeneinander brennen, oder nur eine Flamme, welche gegen ein halbcylindrisch gebogenes (27 cm hohes, 3 cm breites), an einem in die Röhre hineinragenden Stativ befestigtes Messingblech brennt. In letzterem Falle klingt der Grundton der Röhre sehr voll und stark.

Mauritius (1873) empfiehlt, eine Flamme von oben her, die andere von unten in die Röhre einzuführen. Abwärts brennende Flammen seien leichter zum Tönen zu bringen, als aufwärts brennende.

Rayleigh (1879) empfiehlt statt der Röhren anders geformte Resonatoren, z. B. flaschenförmige Gefäße oder in der Mitte bauchig aufgetriebene Röhren aus Gußeisen, da in diesem Falle die Obertöne größtenteils fortfallen.

Daß der chemische Prozeß bei der Verbrennung nichts mit der Entstehung der Töne zu tun hat, zeigt am besten Rijkes Röhre. Eine solche läßt sich leicht aus einem 2 cm weiten, etwa 5 bis 6 dm langen Glasrohr herstellen, indem man in die Mitte der unteren Hälfte ein quadratisches Drahtnetz mit umgebogenen Ecken einschiebt. Erwärmt man dasselbe durch eine eingeschobene kleine Flamme und entfernt letztere wieder, so beginnt die Röhre alsbald kräftig zu tönen.

Nach Rebenstorff (Z. 15, 274, 1902) kann man die Röhren der singenden Flamme bis zur horizontalen neigen, ohne daß das Tönen aufhört, falls man die Röhren nicht gegeneinander verschiebt. Er teilt weiter folgendes mit:

Bläst man aus einer langen dünnen Röhre, die am einen Ende eine kurze, 1 mm weite, rechtwinkelig zur Seite gebogene Spitze hat, Luft oder besser Sauerstoff gegen eine Flamme, die etwas zu groß ist, um von selbst zu tönen, so entsteht der Flammenton, so lange der Luftstrom anhält. Durch Verstärkung der Sauerstoffzufuhr kann man sogar große Flammen zu mächtiger Klangwirkung bringen und die Flammen können ohne Erlöschen unter weiterer Verstärkung des Tones bis in die Mitte der Klangröhre vorgeschoben werden.

Den Ton jeder singenden Flamme kann man ferner durch bloßes Einschieben ziemlich enger Röhren von bestimmten Abmessungen in die Klangröhre auslöschen. Am stärksten wirken solche beiderseits offene „Löschröhren", wenn ihre Länge gleich einem geraden Vielfachen einer Viertel-Wellenlänge des Tones ist. Verlängert man die Röhre durch einen Gummischlauch, welchen man an einer Stelle zusammendrückt, wodurch eine gedeckte Löschröhre entsteht, so verschwindet der Ton, wenn deren Länge gleich einem ungeraden Vielfachen einer Viertel-Wellenlänge des Flammentons ist.

Gieseler (1887) macht darauf aufmerksam, daß man helleuchtende, sicher ansprechende singende Flammen von 10 cm Länge aus Brennern von 1 bis 2 mm Durchmesser in 1,5 m langen Glasröhren erhalten kann, wenn man an den gaszuleitenden Schlauch eine Klemme zur Regulierung der Flamme so anbringt, daß die Gassäule in dem Schlauchstück zwischen Brenner und Klemme denselben Eigenton gibt, wie die Luft in der Glasröhre, d. h. beiläufig etwa gleiche Länge hat. Durch Probieren ist der richtige Punkt leicht zu finden. Es kommt dabei auf Millimeter an.

Nach Rebenstorff (a. a. O.) zeigt der Versuch mit seiner Löschröhre, daß diese Auffassung nicht richtig sein kann, denn die Gaszuleitungsröhre muß, falls ihr Ton mit der Klangröhre übereinstimmt, als Löschröhre wirken.

Nach Geschöser (Z. 12, 94, 1899) kann man auch mit oben geschlossenen Röhren (umgekehrten Standcylindern) singende Flammen erhalten und zeigen, daß

der Ton einer solchen eine Oktave tiefer ist, als der einer gleich langen offenen Röhre. Man läßt Leuchtgas aus einem spitz ausgezogenen Glasrohr gegen ein Drahtnetz strömen, zündet es über demselben an und hebt das Drahtnetz so hoch, daß der innere Flammenkegel fast ganz verschwindet, wobei infolge der sich rasch nacheinander folgenden Explosionen ein schwirrendes Geräusch entsteht. In dieser Lage klemmt man das Drahtnetz an einem Stativ fest und stellt nun die Röhren darauf gerade über die Flamme. Sie fangen sofort an zu singen.

Fig. 3747.

710. Orgelpfeifen. Die Einrichtung der **Zungenpfeifen** wird durch Fig. 3747 und Fig. 3748 erläutert. In dem durchbohrten hölzernen Stopfen *s*, Fig. 3748, ist unten eine Rinne *r* von Messingblech befestigt, deren Querschnitt ungefähr einen Halbkreis bildet, und welche den Namen **Kanüle** führt. Oben ist diese Rinne offen, unten ist sie geschlossen und ihre seitliche Öffnung wird durch die elastische Platte *l* bedeckt, welche bei ihren Vibrationen auf die Ränder der Rinne aufschlagend dieselbe vollständig verschließt und dann wieder zurückschwingend einen Luftstrom in die Kanüle eintreten läßt.

Fig. 3748.

Der Stopfen *s* mit der Kanüle *r* und der Zunge *l* wird nun in das kurze Rohr *pp* eingesetzt, in welches man von unten her den Wind einblasen kann. Sobald dies geschieht, beginnt die Zunge *l* zu vibrieren, es wird also in den für die Zunge bedingten Intervallen ein Luftstrom aus dem Inneren der Röhre *p* durch die Kanüle und die Höhlung *v* hervordringen, um dann sogleich wieder unterbrochen zu werden. Durch dieses stoßweise Vordringen des Luftstromes aus der Höhlung *v* wird nun der Ton erzeugt, zu dessen Verstärkung man noch ein kegelförmiges Rohr, den **Schallbecher**, aufsetzt, wie man es in Fig. 3747 sieht.

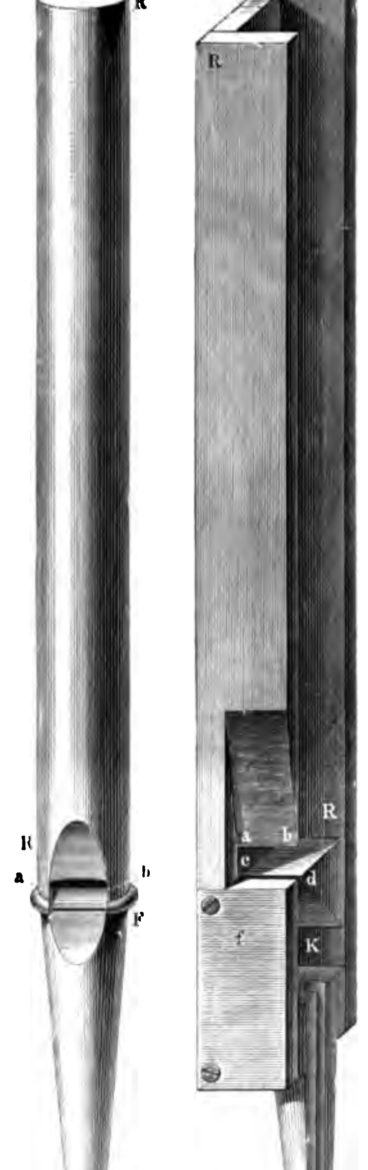
Solche Zungen, wie die in Fig. 3720 (S. 1475) und Fig. 3747 dargestellten, welche etwas kleiner sind als die zugehörige Öffnung, so daß sie mit den Rändern derselben nicht in Berührung kommen, nennt man **durchschlagende** Zungen, im Gegensatz zu den **aufschlagenden** Zungen, welche, wie die Zunge Fig. 3748, bei jeder Oscillation auf die Kanüle aufschlagen. Die aufschlagenden Zungen werden ihres rasselnden Tones wegen selten mehr gebraucht.

Durch Aufziehen oder Niederdrücken des **Stimmdrahtes** *d*, dessen unteres, horizontal gebogenes Ende die Zunge gegen die Kanüle andrückt, kann man die Länge des vibrierenden Teiles der Zunge vergrößern oder verkleinern und dadurch die Tonhöhe verändern.

Wenn gar kein Schallbecher oder doch nur eine kurze Röhre auf das Zungenwerk aufgesetzt ist, so hängt die Schwingungsdauer der Zunge, also der Ton, den

sie gibt, nur von ihrer Elastizität und von ihren Dimensionen ab. Wenn über eine lange Röhre aufgesetzt wird, so modifiziert diese den Ton wesentlich; die Bewegung der Zunge hängt dann mehr von der Bewegung der in der langen Pfeife hin und her laufenden Luftwellen als von ihrer eigenen Elastizität ab; sie wird also eigentlich mehr geschwungen, als sie selbst schwingt.

Fig. 3749. Fig. 3750.



Bei den Lippenpfeifen ist es ein am offenen Ende der Röhre vorbeiströmender, an einer scharfen Kante, der Lippe, sich brechender Luftstrom, welcher durch seine Stöße Wellen erzeugt, die, an dem Boden reflektiert, mit den neu einfallenden interferieren, so daß sich regelmäßige stehende Schwingungen bilden, wodurch dann die Luft in der Röhre selbsttönend wir

Durch die entstehenden Verdichtungen und Verdünnungen wird der gegen die Lippe gerichtete Luftstrahl abwechselnd aus der Pfeife herausgedrü und hineingesaugt, wodurch andererseits auch Energie der Schwingungen wieder verstärkt wi

Die Einrichtung der Lippenpfeifen ist a den Figuren 3749 und 3750 zu ersehen[1]. M unterscheidet an ihnen den Fuß, den Mu und die Röhre, welche entwe offen oder gedeckt sein kar

Fig. 3751.

In Fig. 3749, welche e Zinnpfeife darstellt, ist der F mit FF, die Röhre mit R bezeichnet. Die Röhre hat ihrem unteren Ende vorn e Öffnung ab, welche der Mu genannt wird; Fuß und Rö sind durch eine dünne Zinnpla getrennt: zwischen der vorde Kante dieser Platte, welche d Boden der Schallröhre bildet, u der vorderen Wand des Fuß bleibt eine schmale Spalte, du welche die unten in den Fuß ei geblasene Luft austritt und, i dem sie sich an der oberen Kan des Mundes bricht, die Luftsä an der Röhre RR in stehen Schwingungen versetzt.

Die Einrichtung der hölzernen Orgelpfeifen ist aus dem Durchschnitt Fig. 37 zu ersehen. Die in den Fuß eingeblasene Luft dringt aus dem Behälter K du

[1] Fig. 3751 k, 10, zeigt eine zum Aufklappen vorgerichtete Lippenpfeife.

einen schmalen Spalt *cd* hervor, und bricht sich an der oberen Kante *ab* des Mundes, von welchem unsere Figur nur die Hälfte *abcd* zeigt.

In eine der Pfeifen wird ein Stöpsel, wie Fig. 3752, gerichtet, der an seinem Kopfe ringsum, aber nicht auf seiner Basis beledert wird, um die Versuche mit gedeckten Pfeifen anzustellen. Auf dem Stiele dieses Stöpsels kann man nun sogleich verzeichnen, wie weit derselbe eingeschoben werden muß, damit man die verschiedenen Töne einer ganzen Oktave, sowie andere Töne, die man etwa öfter braucht, erhalte. Will man an einer solchen Pfeife Öffnungen anbringen, um die Schwingungsknoten oder vielmehr die Bäuche zwischen ihnen zu zeigen, so bohrt man dieselben mit dem Centrumbohrer in einer Weite von 5 bis 8 mm aus und versieht sie mit einer Klappe. Eine solche läßt sich aus einem wie in Fig. 3753 zugeschnittenen Stückchen Holz sehr leicht machen. Man leimt nämlich auf die Fläche desselben ein Stückchen weißes Schafleder und das hervorragende Ende *b* dieses Leders auf die Pfeifenwand; die Fleischseite des Leders wird nach der Öffnung gerichtet und eine Drahtfeder *c* dient dazu, die Klappe gegen die Öffnung zu drücken. Man könnte letztere auch unter dem Stiele der Klappe selbst anbringen. Man kann allerdings die Löcher auch durch bloße Schieber verschließen; allein dieses erfordert eine genauere Arbeit. Am allereinfachsten ist der Verschluß mit dem Finger, nur muß man dazu eine eigene Pfeife bestimmen, da sie zu anderen Zwecken nicht mehr brauchbar wäre, und sich mit wenigen Öffnungen begnügen. Für die Versuche mit diesen Öffnungen muß man eine verhältnismäßig lange Pfeife richten, weil sonst der Ort, wo sich die Bäuche bilden, nicht gerade an dem der Theorie nach bestimmten liegt, da bekanntlich die Wellenbewegung in einer Pfeife, wo also ein schmaler Luftstrom an der Lippe die Bewegung hervorbringt, zunächst bei dieser noch nicht regelmäßig ist. Die Pfeife muß 6 dm mindestens messen. Man kann dann in dieselbe vier Löcher bohren, worunter eins für den Fall, wo die Pfeife gedeckt wird, und eins für die offene Pfeife an der gehörigen Stelle, die anderen zwei aber an ungehöriger, keinem Bauche entsprechender Stelle stehen, um den Erfolg auch in diesem Falle zu zeigen. Das Decken darf aber nicht durch einen Stöpsel geschehen, sondern, damit die Länge der Röhre sich nicht ändert, durch einen darüber geschobenen Deckel aus Pappe. Die Öffnung für die offene Pfeife kommt in die Mitte der Länge, jene für die bedeckte auf ein Drittel vom Boden. (S. auch Akustik.)

Fig. 3752.

Fig. 3753.

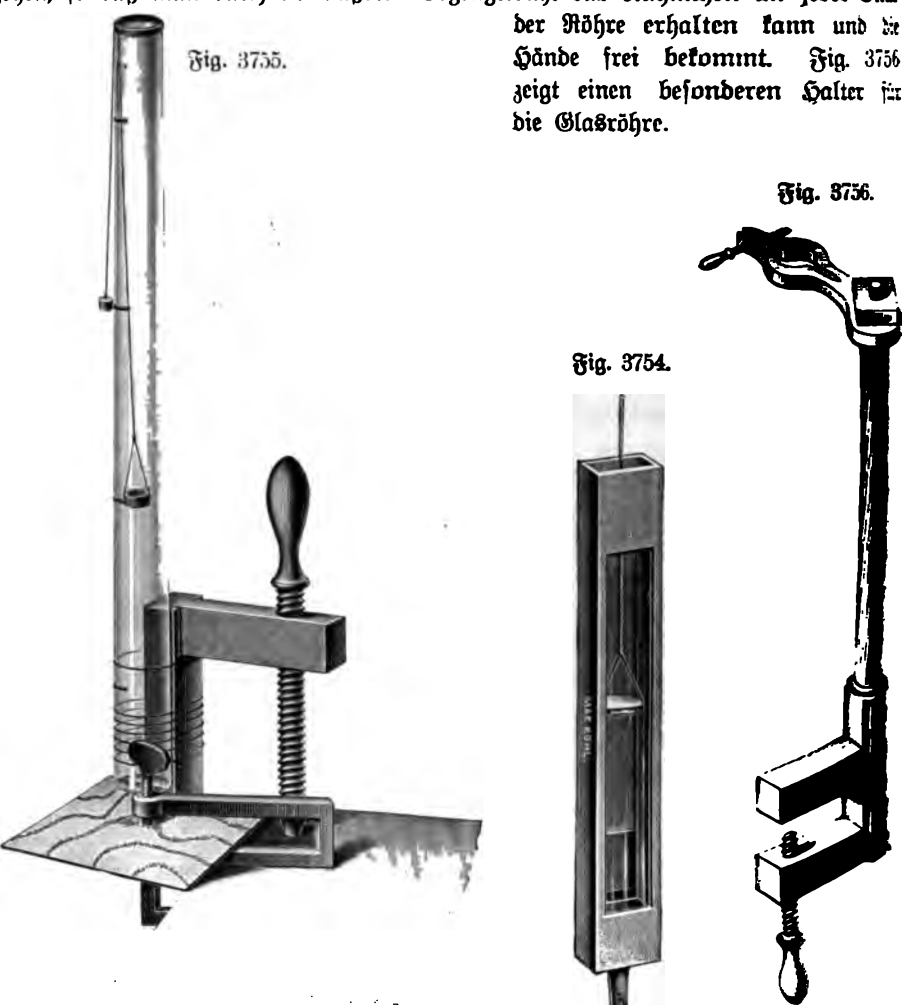


711. Hopkins' Versuch. Nach der Methode von Hopkins wird die Existenz der Schwingungsbäuche und Knoten in einer Orgelpfeife demonstriert durch Einsenken einer mit Sand bestreuten, an Fäden hängenden Membran (dünnes Pergamentpapier) in eine Pfeife mit gläserner Wand. (Fig. 3754 K, 16.) Nimmt man statt Sand Schrotkörner, so braucht die Wand der Pfeife nicht aus Glas zu bestehen, da man das laute Rasseln der Schrotkörner deutlich neben dem Pfeifenton hören kann.

Man kann ferner nach Anleitung von Fig. 3755 die stehenden Wellen in der Röhre durch eine Klangscheibe erregen.

Als Rähmchen nimmt man einen etwa 1 bis 5 cm breiten Reif von Metall, dessen Durchmesser halb so groß ist als jener der Röhre, und bespannt ihn mit

recht feinem Papier, so wie man beim Aufspannen auf das Reißbrett verfährt. Dieses Rähmchen hängt man an drei Fäden, die in einen zusammenlaufen, auf, und läßt diesen über den oberen, mit Papier überleimten Rand der Röhre gehen, so daß man durch ein äußeres Gegengewicht das Rähmchen an jeder Stelle der Röhre erhalten kann und die Hände frei bekommt. Fig. 3756 zeigt einen besonderen Halter für die Glasröhre.


Fig. 3755.
Fig. 3756.
Fig. 3754.

Man sucht nun jene Stellen der Röhre, an welchen der in das Rähmchen gebrachte Streusand sich am wenigsten bewegt, wenn die Schwingungen erregt werden[1].

van Schaik (Z. 8, 249, 1895) bringt an einer Orgelpfeife an zwei gegenüberliegenden Stellen mit Glasplatten verschlossene Fenster von 2,5 cm Weite an; dazwischen befindet sich im Innern der Pfeife ein dünnes, in einen schmalen Spalt endigendes Metallrohr, durch welches quer zur Achse der Pfeife ein schwacher Luftstrom austritt, der die Luftschwingungen mitmacht. Durch einige Flaumfedern werden diese Schwingungen des Luftstrahles sichtbar gemacht.

[1] Eine Pfeife, deren eine Seitenwand mit einer Membran bezogen und mit kleinen Pendelchen versehen ist, welche an den Schwingungsbäuchen lebhaft in Bewegung gesetzt werden, während sie an den Knoten in Ruhe bleiben, liefern Dr. Houdek u. Hervert in Prag zu 10 fl.

712. Kundts Ventil. In dem Deckel *AA* einer gedeckten Pfeife, Fig. 3757, werden zwei Öffnungen angebracht und darüber eine dünne Messingplatte *BB* gelegt welche den Öffnungen entsprechend zwei Schlitze von 1 mm Weite und 3 bis 5 mm Länge enthält. Über den einen ist innerhalb, über den anderen außerhalb

Fig. 3757.

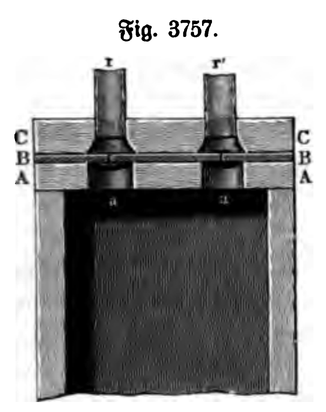


Fig. 3758.

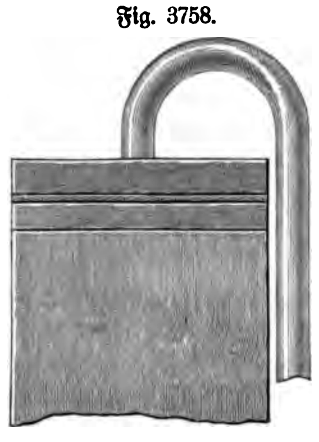
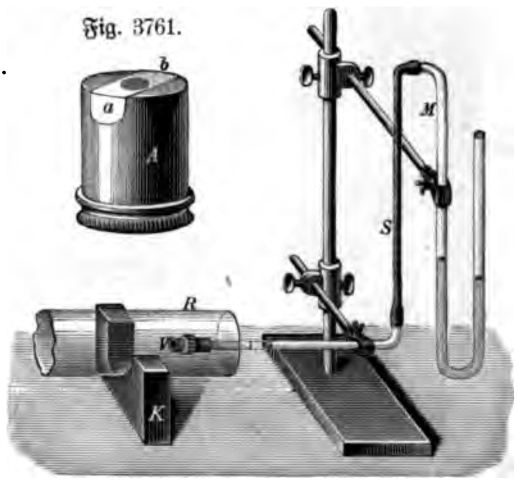


Fig. 3759.



ein schmales Streifchen einer recht feinen Membran (an seinen schmalen Seiten) geklebt, so daß man zwei Ventile hat, von denen das eine sich nach außen, das andere sich nach innen öffnet. Über der Messingplatte ist eine Holzplatte mit entsprechenden Öffnungen angebracht, in welche die Manometerröhren *r*, *r'* eingekittet sind; in diesen befindet sich gefärbtes Wasser. Wo die Platten aufeinander liegen, sind sie mit feinem weichen Leder bekleidet; sie werden durch Schrauben aneinander gepreßt. Gibt die Pfeife ihre Grundschwingung, so steigt die Flüssigkeit in dem einen und fällt im anderen Manometer. Fig. 3757 zeigt den Apparat im senkrechten Durchschnitt, Fig. 3758 von der Seite gesehen. Bei dem Apparat Fig. 3759 (Lb, 44) sind drei Manometer angebracht, das eine ohne Ventil, das andere mit Saug-, das dritte mit Druckventil.

Fig. 3761. Fig. 3760.



Zur Demonstration in großem Maßstabe benutze ich eine etwa 2 m lange, weite Orgelpfeife, in welche ein ebenso langes, dünnes Eisenrohr beliebig weit hineingeschoben werden kann, welches am Ende mit einer zur Aufnahme des Kundtschen Ventils geeigneten Erweiterung versehen ist. Das andere Ende wird durch einen langen Schlauch mit einem großen Differentialmanometer oder einer langen Drucklibelle in Verbindung gesetzt, die an einem schweren Eisenstativ befestigt sind.

Szymanski (1888) benutzt ebenfalls ein mit Ventil *V* versehenes Manometer *M* (Fig. 3760). *R* ist beispielsweise eine auf Stützen *K* ruhende Glasröhre, in welcher stehende Schwingungen erregt werden. Fig. 3761 zeigt den wesentlichen

Teil des Ventils gesondert. Es besteht aus einem Messing- oder Korkstöpfel *A*, welcher längs der Achse etwa 1 bis 2 mm weit durchbohrt ist, und einem an beiden Enden an flach gefeilte Stellen angeklebten Streifchen Seiden- (Cigaretten-) Papier *ab*, welches nur wenig über die Ränder der Öffnung übergreift und keine Spannung besitzt. Um dichten Schluß zu erhalten, wird dasselbe behaucht und mit dem Finger schwach an die Öffnung angedrückt, so daß es sich genau dem Rande derselben anschmiegt. Das Manometer wird mit gefärbtem Wasser gefüllt und, wenn die Niveaudifferenz beträchtlich ausfallen soll, schief gestellt. Der Apparat ist zu beziehen vom Mechaniker W. Langhoff in Berlin.

Vollkommener als Kundts Ventil wirkt Wiens Stroboskopventil, welches nicht durch den Luftdruck, sondern z. B. durch eine isochron schwingende Stimmgabel geöffnet und geschlossen wird.

713. Die manometrischen Flammen nach R. König. An drei Stellen einer gewöhnlichen hölzernen offenen Orgelpfeife von etwa 7 bis 8 dm Länge und nur etwa 5 cm Weite werden drei Öffnungen gebohrt von der Weite, daß sich manometrische Kapseln darin befestigen lassen, und zwar eine in der Mitte und je eine um $1/4$ der Pfeifenlänge von den Enden.

Fig. 3763.

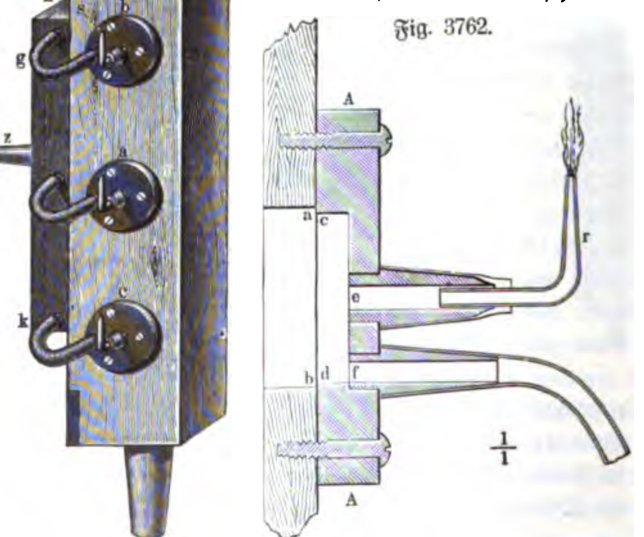


Fig. 3762.

Die Einrichtung einer solchen manometrischen Kapsel zeigt Fig. 3762.

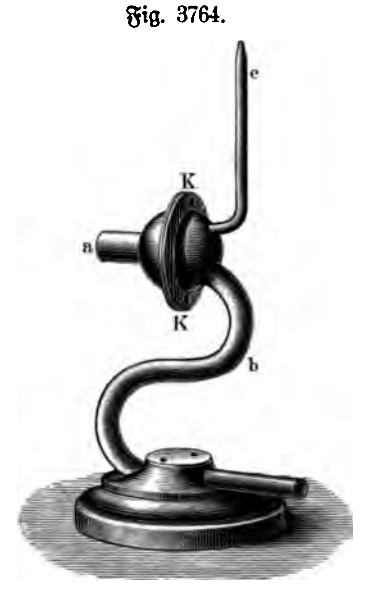
Über die Öffnung *ab* wird eine dünne Kautschukmembran [1]) gespannt und darüber das Kästchen *AA* geschraubt. In das Kästchen münden zwei Röhrchen; in das mittlere *e* ist mittels Kautschuk das zugespitzte Glasröhrchen *r* befestigt und durch *f* wird Leuchtgas zugeleitet.

Damit alle drei Kästchen einerlei Gasdruck haben, wird an die Seite der Pfeife wie in Fig. 3763 ein Kästchen *kk* geschraubt, welches das Gas erhält und an die drei kleinen Kästchen *a*, *b*, *c* abgibt. Die drei kleinen Flammen brennen ruhig, wenn die Pfeife nicht tönt; gibt die Pfeife die Grundschwingung, so zittert die mittlere Flamme stark, die anderen schwächer, alle drei werden kleiner; gibt die Pfeife die Oktave, so bleibt die mittlere Flamme ruhig, während die beiden andern zittern oder auslöschen. (R. König, Paris, 45 Frank.)

[1]) Wallachs Nachf. in Kassel liefern hierzu besser geeignete Membranen aus Goldschlägerhaut.

Anstatt die Pfeife anzubohren und mit mehreren manometrischen Kapseln zu versehen, kann man einfacher nach Harion (1882) eine engere Röhre mehr oder weniger tief von oben in die Orgelpfeife einsenken und diese mit einer isolierten Kapsel auf einem Stativ (Fig. 3764 K, 9) verbinden, deren Öffnung rückwärts durch einen etwas ausgehöhlten Deckel geschlossen wird, in welchem sich ein Röhrchen befindet, an welches man ein Kautschukrohr steckt, um die Wellen zuzuleiten.

Fig. 3764.



Köhler (Z. 12, 95, 1899) benutzt einen vereinfachten Töplerschen Flammenzeiger. Ein Glasrohr von 5 bis 6 mm Weite und der ein ein halbfachen bis doppelten Länge der zu benutzenden Orgelpfeife wird an dem einen Ende in eine Spitze von 1 mm Weite ausgezogen. Es wird in die horizontal liegende Pfeife eingeschoben, so daß die herausragende Spitze gegen eine kleine Gasflamme von 1 bis 2 cm Höhe gerichtet ist, welche aus einer Röhre von 3 mm Durchmesser brennt. Befindet sich das andere, offene Ende in der Mitte der Pfeife, so wird die Flamme, wenn die Pfeife ihren Grundton gibt, stark zur Seite geblasen. Bringt man durch stärkeres Blasen den Oberton hervor, so bleibt die Flamme fast in Ruhe. Es ist zweckmäßig, den Flammenzeiger und das Rohr unverrückbar zu befestigen und über dem freien Ende des Rohres ein Pendelchen so aufzuhängen, daß man die Pfeife darunter bequem über das Rohr schieben kann. Das Pendelchen zeigt dann immer die Lage des offenen Endes des Glasrohres in der Pfeife an.

Rubens[1]) demonstriert die stehenden Luftwellen an einer Gasleitungsröhre mit Membranverschluß am einen Ende und zahlreichen gleich abstehenden, engen Öffnungen, welche als Brenner dienen. An den Knoten verlängern sich die kleinen Flämmchen beträchtlich infolge der starken Druckschwankungen; doch treten auch Störungen infolge der Reibung auf.

Fig. 3765.



714. Resonatoren. Membranflasche. Um nachzuweisen, daß die Luft eines Resonators, Fig. 3765 (Lb, 9), wirklich eigene Schwingungen ausführt, kann man eine Seitenwand des Resonators aus einer Membran bilden und diese mit Sand bestreuen.

Quincke verwendet eine aus zwei ineinander verschiebbaren Teilen bestehende umgekehrt aufgestellte Flasche, deren Boden aus der Membran gebildet ist. Die sehr dünne Kautschukmembran wird über einen kurzen, unten mit Flansche versehenen Cylinder gebunden und dieser mittels drei von Spiralfedern umgebenen Schrauben an die Flansche eines zweiten etwas engeren Cylinders geschraubt, welcher in den ersteren bis zur Membran hineinragt, so daß diese um

[1]) Rubens, Ber. d. d. phys. Ges. 2, 351, 1904.

so mehr gespannt wird, je mehr man die Schrauben anzieht; in diesen zweiten, an einem Stativ befestigten Cylinder wird dann der andere (Hals-) Teil der

Fig. 3766.



Flasche eingeschoben. Durch mehr oder minder tiefes Einschieben und auch durch verschieden starkes Anspannen der Membran wird die Flasche gestimmt.

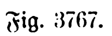


Fig. 3767.



Manometrische Flammen. R. König verbindet mit den Resonatoren seine manometrischen Flammen. Fig. 3766 zeigt einen derartigen Königschen Apparat mit zahlreichen Resonatoren und manometrischen Kapseln nebst dem rotierenden Spiegel. Er wird in zwei Größen geliefert: mit 14 Resonatoren zu 650 Frank und mit 8 Resonatoren zu 325 Frank. Derselbe Apparat ist zu beziehen von Leybolds Nachf. (mit 14 Universalresonatoren nach Fig. 3767) zu 600 Mk. (Die Resonatoren sind cylindrisch und in sich verstellbar, so daß der erste von G bis H, der zweite von H bis dis, der dritte von dis bis fis u. s. w. geht.)

Solche Apparate mit vielen Resonatoren dienen insbesondere dazu, Gemische verschiedenartiger Wellen zu analysieren, d. h. diejenigen einfachen Sinusschwingungen

aufzufinden, aus welchen die Wellenbewegungen zusammengesetzt gedacht werden können [1]).

Rayleigh (1882) verwendet einen Resonator, dessen eine Seitenwand aus Seidenpapier gebildet ist. Durch eine unten angebrachte Ansatzröhre wird Leuchtgas hinein geleitet, durch eine zweite hinaus. Die letztere ist eine oben aufgesetzte Messingröhre, welche zugleich als Brenner dient. Zündet man das Gas an und läßt den dem Resonator entsprechenden Ton ertönen, so schwingt die Flamme.

Ridout läßt eine Brennerröhre in einem Resonator aufsteigen und die Flamme zur Öffnung des Resonators herausbrennen.

Drenteln (Z. 7, 273, 1894) demonstriert das Ansprechen von Resonatoren (einseitig geschlossenen, birnförmigen Lampencylindern) durch Aufstreuen von Korkstaub oder Lykopodium auf den inneren Rand der Öffnung. Die Pulver werden sofort weggeblasen, sobald der Resonator in Tätigkeit kommt. Auch eine kleine, leicht auslöschende Flamme (gespeist mit Vaselinöl) kann in gleicher Weise benutzt werden.

Man kann hier anschließen Betrachtungen über Dämpfung fortschreitender Wellen durch Resonatoren, Absorption und Reflexion der Energie.

715. Dopplers Prinzip. Bewegt sich die Schallquelle gegen einen Resonator hin oder davon weg, so wird die Anzahl Stöße, die ihn pro Sekunde treffen, größer bezw. kleiner, d. h. es wird die Resonanz gestört. Umgekehrt wird ein Resonator ansprechen können (z. B. bei Verwendung des Apparates Fig. 3766), welcher bei ruhender Quelle der Schwingungen nicht in Tätigkeit kommen würde. Man könnte geradezu aus der Art des in Tätigkeit tretenden Resonators die Geschwindigkeit, mit der sich der schwingende Körper bewegt, berechnen [2]).

Läßt man nach A. und L. Weinhold (Z. 17, 92, 1904) eine Stimmgabel von 435 Schwingungen auf der Schwungmaschine so rotieren, daß die Mittellinie der beiden Zinken in die Drehungsachse fällt und die Tourenzahl 20 pro Sekunde beträgt, so wird für den Beobachter eine sinoidale Änderung der Amplitude hervorgebracht, welche den Schwingungszahlen 395,5 und 474,5 entspricht. Durch Resonatoren, welche auf diese Schwingungszahlen abgestimmt sind, kann man die Existenz dieser beiden Töne leicht nachweisen. Um die Stimmgabel zu erregen, klemmt man einen kleinen Keil von hartem Holz so zwischen die Zinken, daß er sie etwas auseinander drückt, und zieht ihn rasch heraus.

Fig. 3768.

716. Interferenz von Luftwellen. Nach Desains (1860) kann man die Interferenz deutlich beobachten, wenn man eine kräftige Pfeife in einem wattierten Kasten mit zwei Löchern anbläst und über die Löcher eine mit Sand bestreute Membran hält.

[1]) Wie Töpler nachgewiesen hat, kann man mathematisch auch umgekehrt eine einfache Schwingung aus komplizierten zusammensetzen, Resonatoren dagegen vermögen nur komplizierte Schwingungen als Kombination einfacher Sinusschwingungen darzustellen. — [2]) Hier wären auch die Streckwellen zu erwähnen, die sich bilden, wenn ein Geschoß die Luft durchfliegt, und von Mach auf photographischem Wege näher untersucht wurden. Ein mechanisches Modell zur Demonstration des Dopplerschen Prinzips beschreibt Gauger (Z. 16, 329, 1903).

(Fig. 3768.) Bleibt der Sand an einer Stelle infolge der Interferenz in [illegible] kommt er in Bewegung, sobald man das eine Loch schließt.

Fig. 3770 A.

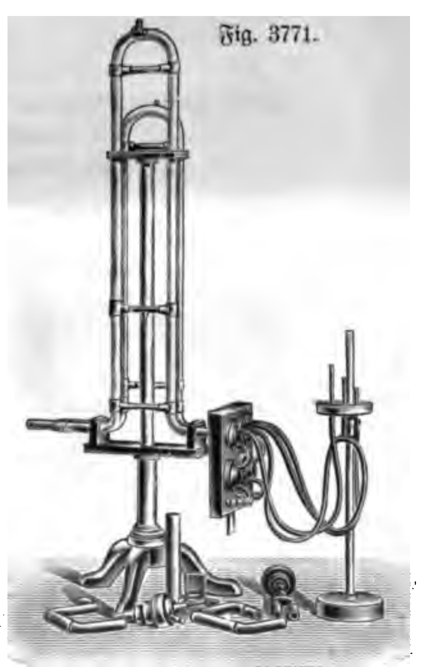
Fig. 3770 B.



Nach einem von [illegible] und Nörrenberg [illegible] Prinzip kann man durch [illegible] zweigung einer Röhre in [illegible] von ungleicher Länge, [illegible] wieder vereinigen (Fig. 3769, [illegible] Quincke) Luftwellen durch Interferenz vernichten, falls der [illegible] unterschied in den beiden Zweigen ein Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt. Zur Ausführung des Versuchs eignet sich besonders die Interferenzröhre nach Quincke und Kundt, Fig. 3770 A und B. Eine Kundtsche Röhre zur Erzeugung der Staubfiguren (Fig. 3770 A, *bdachk*) ist in der Mitte in zwei Zweige (*g* und *f*) gespalten, von welchen der eine durch einen ausziehbaren Bügel *ofn*, wie bei einer Posaune (vergl. Fig. 3770 B), sich verlängern läßt. Sind zunächst die beiden Zweige gleich lang, so entstehen die Staubfiguren wie gewöhnlich, ist aber der Bügel so weit ausgezogen, daß der Weg der Wellenbewegung in diesem Zweige um $oo' + nn'$ (Fig. 3770 B) $= \frac{1}{2}$ Wellenlänge vergrößert ist, so bleiben die Figuren in der hinteren Hälfte *hk* des Rohres aus, da sich die beiden Wellenzüge bei der Wiedervereinigung gegenseitig vernichten. Sind die Zweigröhren aus Glas, so kann man auch in ihnen Staubfiguren erhalten und so die Wellen verfolgen bis zu dem Punkte, wo sie sich vernichten. Bleiben die Figuren aus und erwärmt man das eine Zweigrohr durch eine untergesetzte Lampe, so erscheinen sie wieder, weil durch die Temperatur-

Fig. 3769.




Fig. 3771.

Erhöhung die Schallgeschwindigkeit geändert wird. Bei der Figur ist der Durchmesser der Röhren doppelt so groß gezeichnet, als er im Verhältnis zur Länge sein sollte.

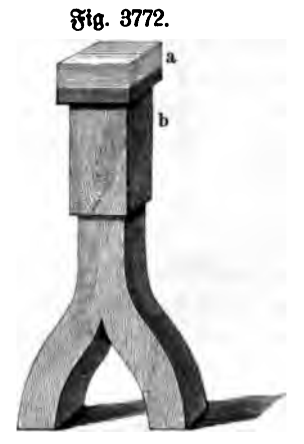
Statt der Kundtschen Röhre kann auch eine als Resonator dienende Quinckesche Membranflasche (S. 1497) benutzt werden.

Antolik (1891) ersetzt den Resonator durch eine empfindliche Flamme, deren Brenner durch ein seitliches Ansatzrohr mittels eines Schlauches mit der Röhre verbunden wird.

Drentelen (1894) setzt auch da, wo Verzweigung der Röhren eintritt, Resonatoren in Form dreihalsiger gläserner Kolben ein.

Fig. 3771 (Lb, 220) zeigt eine Abänderung des Apparates, bei welcher manometrische Flammen zum Nachweis der Luftbewegung benutzt werden. Füllt man den einen Zweig mit einem anderen Gase, z. B. Leuchtgas statt Luft, so wird die Interferenz entsprechend gestört.

Fig. 3772.



Sehr einfach kann man zwei Wellenzüge in folgender Weise zur Interferenz bringen. Eine gabelförmige Röhre, wie Fig. 3772, aus Holz oder Pappe, deren Schenkel so lang sind, daß man sie über die Schraube *b*, Fig. 3469 (S. 1362), weg einer in die ebengenannte Figur eingeschraubten Scheibe bis auf etwa 1 mm nähern kann, wird an dem gemeinschaftlichen Ende beider Schenkel mit dünnem Papier bespannt, worauf Sand gestreut wird. Dieser Sand bleibt ruhig, wenn man die Gabel über zwei Stellen der Scheibe hält, wovon die eine aufwärts, die andere abwärts schwingt. Hält man aber die Schenkel der Röhre über zwei Stellen der Scheibe, welche zugleich aufwärts und abwärts schwingen, so wird der Sand lebhaft bewegt. Letzteres ist z. B. der Fall, wenn man die Röhre über zwei nicht aneinanderliegende Flächen der Scheibe hält, wenn diese als Klangfigur ein einfaches Kreuz gibt, während zwei aneinanderliegende Flächen die erstere Erscheinung hervorbringen.

Sehr häufig bildet dann der Sand auch auf dem dünnen Papiere eine Klangfigur, die jedoch nichts mit der anderen gemein hat. Um letztere Klangfigur rein hervorzubringen, ist die Länge der gemeinschaftlichen Röhre nicht gleichgültig und man spannt deshalb das Papier erst auf einer zweiten über der ersten verschiebbaren Röhre *ab* auf, um die Länge nötigenfalls ändern zu können.

Auch mit einer einzigen Stimmgabel kann man Interferenzen erhalten, da z. B. beim Auswärtsschwingen der Zinken die Luft außen verdichtet, innen verdünnt wird, also zwei Wellensysteme von der Gabel ausgehen, die in ihrer Phase um eine halbe Wellenlänge verschieden sind. In den diagonalen Richtungen haben sie gleiche Stärke und heben sich daher auf, wie man durch einen Resonator nachweisen kann [1]).

717. Schwebungen kann man leicht mit Königs manometrischen Flammen nachweisen, wenn man zwei gleiche Orgelpfeifen ansprechen läßt und die eine gegen die andere etwas verstimmt.

van Schaik (Z. 7, 182, 1894) empfiehlt zur Demonstration der Schwebungen die Wirkung einer Resonanzkugel auf eine vor die enge Öffnung gestellte Kerzen-

[1]) Siehe auch Mikola, Z. 17, 209, 1904.

flamme, wenn eine Pfeife betätigt wird, deren Ton etwas vom Eigenton des Resonators abweicht. Bei jeder Schwebung wird ein Wirbelring aus dem Resonator ausgestoßen, welcher die Flamme stört.

718. Kraftäußerungen in Luft pulsierender oder oscillierender Körper. Pulsierende Kugeln. Schwedoff (1880) verwendet, ähnlich wie Bjerknes (1879) bei Flüssigkeiten, pulsierende Kugeln in luftförmigen Medien, um die elektrischen Erscheinungen nachzuahmen. Dieselben verhalten sich umgekehrt, wie diejenigen von Bjerknes (siehe S. 1432)[1].

Akustische Anziehung und Abstoßung. Schellbach füllt von zwei Ballons aus Goldschlägerhaut den einen mit Sauerstoff, den anderen mit Wasserstoff, und befestigt beide an Fäden. Der den Sauerstoffballon tragende Faden wird an der Zimmerdecke, der Faden des Wasserstoffballons am Fußboden befestigt, so daß die beiden Ballons in gleicher Höhe schweben. Setzt man nun eine nahe dabei aufgestellte Stimmgabel mit Resonanzkästchen in Tätigkeit, so nähert sich der Sauerstoffballon der Öffnung des Resonanzkästchens bis zur Berührung, der Wasserstoffballon dagegen wird heftig zurückgestoßen.

Akustische Rotationsapparate nach Dvorschak. Zum Inbetriebsetzen ist eine sehr kräftig tönende Stimmgabel mit Resonanzkasten nötig, welche elektromagnetisch erregt wird. Um den Ton einer solchen Stimmgabel auf größte Stärke zu bringen, ist es nötig dafür zu sorgen, daß das Holz des Resonanzkastens, ebenso wie auch die in ihm enthaltene Luftmasse, möglichst genau auf den Ton der Stimmgabel abgestimmt seien. Nach Dvorschak (1875) ist dies bei den meisten im Handel zu beziehenden Stimmgabeln nicht der Fall. Ist der Holzton zu hoch, so kann man durch Abhobeln der Unterseite des Resonanzkastens abhelfen. Um den Holzton zu hören, klemmt man zwischen die Zinken der Stimmgabel einen Kork, füllt das Innere des Resonanzkastens mit Baumwolle und schlägt nun den Resonanzkasten von oben mit einem Korkhammer an. Nach einiger Übung gelingt es unschwer, die Höhe des Tones zu beurteilen, eventuell kann man rasch nacheinander mehrere Resonanzkasten von verschiedener Tonhöhe anschlagen, wodurch der Unterschied sofort deutlich wird. Um ferner dem Kasten möglichste Freiheit zur Ausführung der Schwingungen zu geben, empfiehlt Dvorschak, nicht, wie es gewöhnlich geschieht, zwei Kautschukschlauchstücke quer über den Boden als Füßchen anzuleimen, sondern vier kleinere Schlauchstückchen der Länge nach gerichtet (s. a. S. 1488) in den Ecken[2]. Die Apparate sind folgende:

Das akustische Reaktionsrad. Es besteht, wie Fig. 3773 zeigt, aus vier hohlen, an einer Seite geöffneten Glaskugeln, welche an den Armen eines horizontal auf einer Spitze drehbaren Kreuzes angebracht sind, so daß die Öffnungen alle gleiche Richtung haben. Die Drehung erfolgt im gleichen Sinne wie bei einem gewöhnlichen Reaktionsrade, so daß die Kugeln mit der geschlossenen Seite vorangehen.

---

[1]) Näheres siehe Séances de la Soc. de Phys. franç. 1880, S. 16. — [2]) Zur elektromagnetischen Erregung dient ein Elektromagnet zwischen den Zinken der Gabel, bestehend aus zwei durch ein Papierblatt getrennten und mit umsponnenem Draht bewickelten Eisenplatten. Derselbe wird von einem F-förmigen hölzernen Arm getragen, welcher an einer Seitenwand des Resonanzkastens befestigt ist. Als Stromunterbrecher dient eine zweite gleiche Stimmgabel mit Elektromagnet und Quecksilberunterbrecher, wobei man zur Vermeidung der Extrastromfunken einen Nebenschluß anbringt.

Der Schallradiometer. An die Arme eines beweglichen Kreuzes sind, wie in Fig. 3774 dargestellt, vier Flügel aus 0,8 mm dickem Karton befestigt, welche mit zahlreichen, einseitig aufgeworfenen Öffnungen versehen sind. Zum Durchschlagen der Löcher dienen die in Fig. 3775 dargestellten Punzen. Zunächst wird mit dem Ausschlageisen A ($ab = 3{,}8$ mm, $cd = 2$ mm) auf einer Bleiunterlage ein Loch ausgeschlagen, dann steckt man den Stift von B ($fg = 2$ mm, Kegelwinkel $= 55^0$) in das Loch ein, bringt den Karton über die im Schraubstock befestigte Punze C ($hi = 4$ mm), steckt den hervorragenden Teil des Stiftes in die Öffnung ein

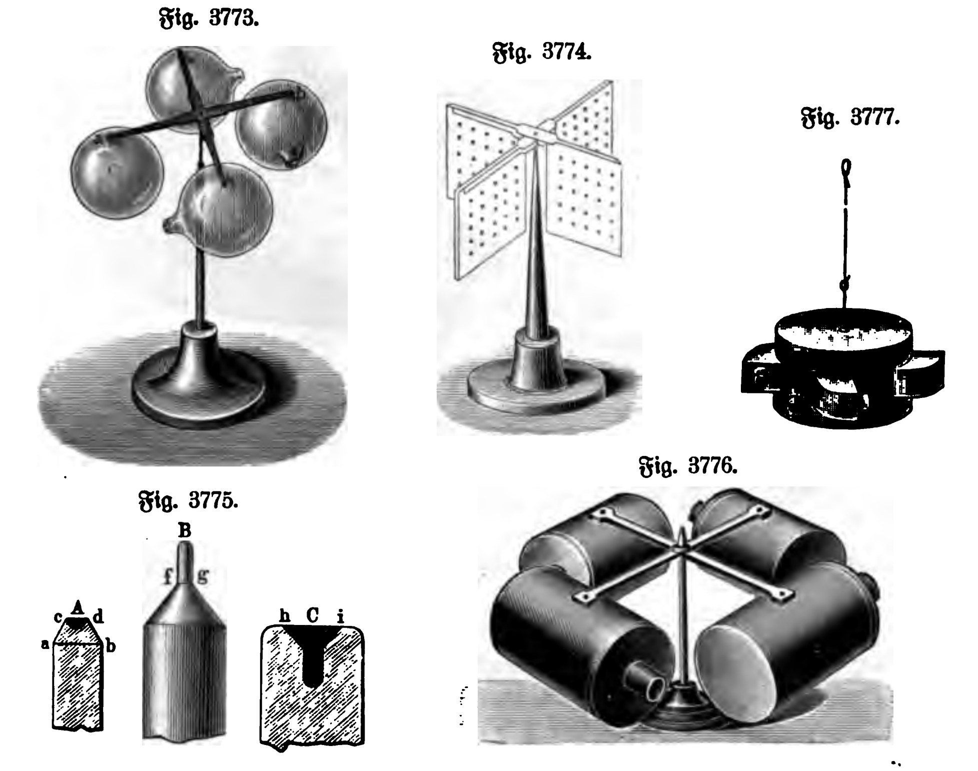


Fig. 3773. Fig. 3774. Fig. 3777. Fig. 3775. Fig. 3776.

und bewirkt durch drei oder vier Hammerschläge auf B, daß sich der (zuvor etwas befeuchtete) Karton der kegelförmigen Höhlung anschmiegt. (Fig. 3776 Lb, 66 und 3777 Lb, 7 zeigen andere Formen des Reaktionsrades.)

Das akustische Windrad nach Weinhold. Ein gewöhnlicher Helmholtzscher kugelförmiger Resonator wird vor den Resonanzkasten der Stimmgabel so aufgestellt, daß die engere Öffnung von ihm abgewandt ist. Stellt man hinter letztere eine kleine Windmühle, so wird diese in Drehung versetzt, gerade als käme aus dem Resonator ein kontinuierlicher Luftstrom heraus. Der Resonator muß (ebenso wie die Resonatoren des Reaktionsrades) auf den Ton der Stimmgabel abgestimmt sein. (Fig. 3778 K, 4.)

Wood[1]) konzentriert Luftwellen mittels eines Hohlspiegels auf die eine Seite eines leichten horizontalen Rädchens aus Aluminium mit Glimmerflügel. Durch den Druck der Schallstrahlen wird es in rasche Rotation versetzt. Als Schallquelle dienen die Funken eines Induktoriums mit Leidener Flaschen.

[1]) Wood, Phys. Zeitschr. 6, 22, 1905.

Schallmanometer, Fig. 3779 (Lb, 11 bezw. 20). Vor die Öffnung des Resonators ist ein schiefes Alkoholmanometer gesetzt, welches durch den aus dem Resonator austretenden Luftstrom beeinflußt wird[1].

Das Phonoskop von W. Apel (1888) in Göttingen besteht aus einem röhrenförmigen Resonator *A* (Fig. 3780), in welchem am einen Ende *a* ein dünnes, aus zwei durch einen Querarm verbundenen Hälften bestehendes Blättchen auf einer Spitze mittels eines Glashütchens, ähnlich wie bei Radiometern, leicht drehbar aufgehängt ist. Tritt der Resonator in Tätigkeit, so dreht sich das Blättchen in die Stellung parallel zur Öffnung.

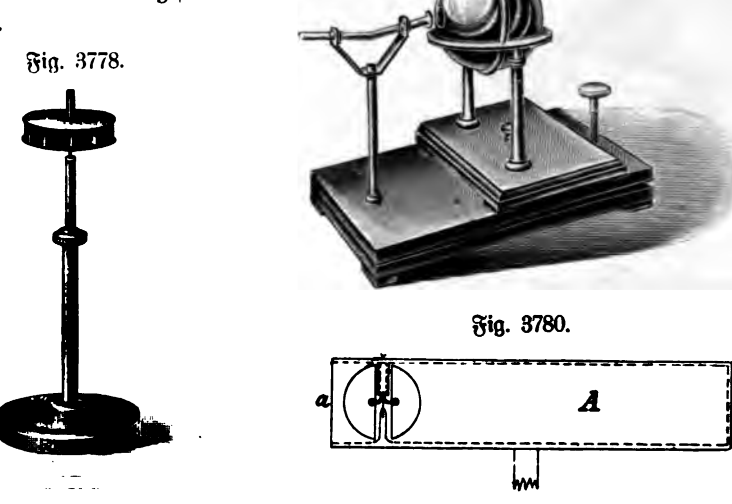
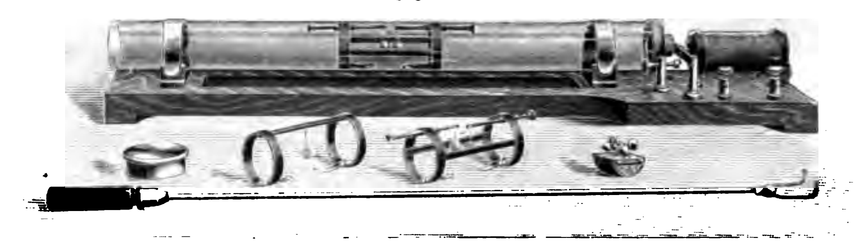


Fig. 3779.

Fig. 3778.

Fig. 3780.


Fig. 3781.

Der in Fig. 3781 (E, 54) dargestellte Apparat nach W. König (Z. 8, 191, 1894) ist dazu bestimmt, die Entstehung der Rippungen bei Bildung der Kundtschen Staubfiguren aufzuklären. Die Luft in dem Rohr wird dadurch in Schwingung versetzt, daß gegen eine Membran an einem Ende ein elektromagnetischer Hammer schlägt. An einem eingebrachten Gestell hängen zwei kleine Holundermarkpendelchen. Sind sie hintereinander, so stoßen sie sich scheinbar ab, sind sie nebeneinander, so ziehen sie sich an.

[1] Siehe auch Dvorschak, Z. 4, 186, 1893; Phys. Zeitschr. 2, 490, 1901, und Davis, Phys. Zeitschr. 2, 348, 1900 und 3, 59, 1902.

Zwölftes Kapitel.

Thermodynamik.

719. Mechanische Wärmetheorie. Im allgemeinen bewährte sich bei den mechanischen Erscheinungen der Satz der Erhaltung der Energie, doch zeigten sich auch sehr auffällige scheinbare Ausnahmen. Fällt ein Stein herunter auf unelastische Erde, so bleibt er liegen, seine Energie scheint spurlos verschwunden. Schleudern wir einen Stein auf horizontaler Bahn, so wird seine Bewegungsenergie vollständig vernichtet durch Reibung. Anderseits scheint auch Energie aus nichts entstehen zu können. Eine Dampfmaschine, ein Gasmotor, eine Kanone können gewaltige Arbeitsleistungen verrichten, ohne daß eine der erzeugten Bewegungsenergie äquivalente Menge potentieller Energie verbraucht würde. Wasserräder und Windmühlen sind scheinbar unerschöpfliche Energiequellen, die nicht ablaufen können, wie ein durch Gewicht betriebenes Uhrwerk.

In der Tat wären diese Fälle Ausnahmen von dem Gesetze der Erhaltung der Energie, wenn die früher angenommene Ansicht über das Wesen der Wärme, die Stofftheorie, zutreffend wäre. Diese ist aber, wie zuerst Graf Rumford[1]) gezeigt hat, durchaus nicht zutreffend, denn es ist möglich, durch Reibung oder Stoß unbegrenzte Mengen von Wärme zu erhalten, was nicht der Fall sein könnte, wenn die Wärme lediglich ein feines Fluidum wäre, das durch die Kraftwirkung aus den Poren der Körper herausgetrieben wird. Die Wärme muß notwendig etwas der Bewegung Gleichartiges sein, ein Bewegungszustand der kleinsten Teilchen der Körper, der sich unserer direkten Wahrnehmung entzieht und lediglich durch den Reiz bemerkbar macht, den er auf die Tastnerven ausübt.

720. Rumfords Versuche. Die Entstehung von Wärme durch Reibung fester Körper kann man schon durch Reiben der Kugel eines Luftthermometers erkennen.

Looser (Z. 8, 296, 1895) reibt die eine Halbkugel seines Doppelthermoskops mit einer Schmirgelfeile. Auch Dubrowsky benutzt das Doppelthermoskop.

Ein dicker Kunstkork wird in der Mitte mit einer groben Säge durchsägt, beide Stücke auf die kegelförmigen Rezeptoren gelegt, sodann der eine mit der rauhen Fläche schnell über ein Stück Sandpapier gestrichen und sofort mit der geriebenen Fläche nach unten wieder auf den Rezeptor aufgelegt.

Wird ein an einem Drahte befestigtes Stück Zinn auf Steinunterlage gehämmert und in die mit Alkohol zum Teil gefüllte Thermoskopkapsel gebracht, so zeigt sich eine erhebliche Erwärmung.

Besonders überzeugend ist der Tyndallsche Versuch (Fig. 3782). Eine mit heißem Wasser gefüllte luftdicht verkorkte Röhre *b* wird mittels der Schwungmaschine oder besser mittels einer durch einen Motor getriebenen Transmission in rasche Umdrehung versetzt und die Bewegung durch Andrücken hölzerner Bremsbacken *T*, die in eine geeignete Zange gefaßt sind, gedämpft. Bald übersteigt der Dampfdruck den der Atmosphäre und den Widerstand des Stöpsels und letzterer wird mit lebhaftem Knall

[1]) Eine Abbildung des Rumfordschen Apparates findet man in Dannemann, Die Entwickelung der Naturwissenschaften 2, 337, Leipzig 1898, W. Engelmann.

und unter Umherspritzen des dampfenden Wassers herausgeschleudert. Statt Wasser kann man auch eine leichtflüssige Legierung eingießen und dieselbe durch die Wärme zum Schmelzen bringen, doch ist hierzu ein beträchtlicher Kraftaufwand nötig.

Bremst man einen mittels eines vierpferdigen Elektromotors in Drehung versetzten Holzcylinder mittels einer hölzernen Kluppe (Fig. 3783 Lb, 6,50), so verkohlt derselbe sofort unter großer Rauchentwickelung, und unter günstigen Umständen kann auch eine Flamme erhalten werden. (Alte Methode des Feueranmachens.)

Läßt man eine Holzscheibe durch eine Transmission in rasche Drehung versetzen[1] und hält ein zugespitztes Stück hartes Holz dagegen, so entsteht sofort

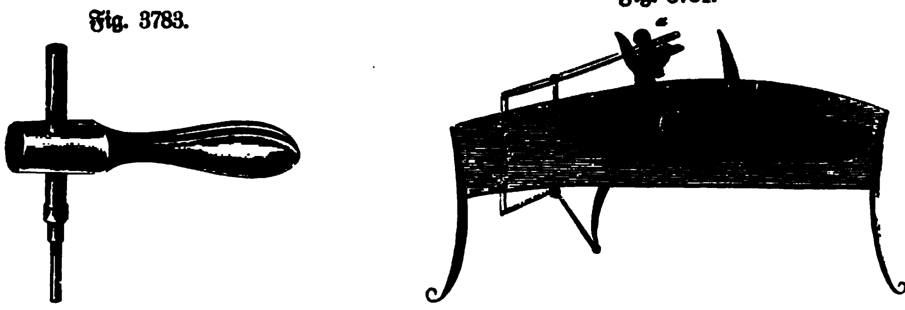


Fig. 3782.

durch Verkohlung ein schwarzer Ring, eine Erscheinung, von der Drechsler Gebrauch zu machen pflegen, um gedrehte Gegenstände zu verzieren.

Kester (1885) empfiehlt, bei dieser Gelegenheit auch das Funkensprühen beim Feuerschlagen eingehender zu erklären und durch Auffangen der Funken auf

Fig. 3783. Fig. 3784.



einem weißen Blatt Papier und Betrachten derselben unter dem Mikroskop nachzuweisen, daß es geschmolzene Kügelchen von Eisenoxyduloxyd sind.

Außerordentlich glänzendes Funkensprühen zeigt Cereisen, schon beim Bearbeiten mit der Feile.

Unter dem Rezipienten der Luftpumpe gibt Stahl kein Feuer, wie man mit einem alten Steinflintenschloß, Fig. 3784, nachweisen kann.

Gleiches gilt von einem Schleifstein.

In Luft kann man dagegen mit einer Schmirgelscheibe von etwa 30 cm Durchmesser und einer Stahlstange einen schönen Funkenregen erhalten[2]. (Sternschnuppen, Meteore, Feuerkugeln.)

---

[1]) Dabei sind Vorsichtsmaßregeln zu treffen, daß sie nicht durch Zentrifugalkraft zerrissen werden kann. — [2]) Auch hier müssen Vorsichtsmaßregeln getroffen sein, daß, falls der Schleifstein explodieren sollte, kein Schaden angerichtet werden kann.

721. Kinetische Gastheorie. Ist die mechanische Wärmetheorie zutreffend, ist die Wärme nur ein Bewegungszustand der Moleküle, so müssen sich die Verhältnisse am einfachsten gestalten bei den Gasen, deren Moleküle nicht durch Kohäsionskräfte aneinander gebunden sind. In der Tat ist es möglich, auf Grund der Annahme, daß sich die Gasmoleküle einfach dem Trägheitsgesetze entsprechend geradlinig bewegen bis sie aufstoßen und dann zurückprallen wie vollkommen elastische Kugeln, die Hauptgesetze der Gase, die Gesetze von Mariotte und Gay-Lussac, sowie die Erscheinungen der Diffusion, inneren Reibung und Wärmeleitung aufs beste zu erklären unter der Annahme, daß die kinetische Energie der Moleküle proportional sei der absoluten Temperatur. Hierdurch wird auch die wahre Bedeutung der absoluten Temperaturskala, sowie die des absoluten Nullpunktes erklärt. Letzterer ist der Punkt, bei welchem den Molekülen alle Bewegungsenergie entzogen ist, bei welchem sie in vollkommener Ruhe sind, abgesehen von einer Bewegung des Gases im ganzen, welche sich nicht als Wärme fühlbar macht und nicht auf das Thermometer einwirkt. Es ist auch möglich zu berechnen, welche Geschwindigkeit und welche Dimensionen die Gasmoleküle haben müssen, und wie groß ihre Zahl in der Volumeneinheit angenommen werden muß, um das tatsächliche Verhalten der Gase zu erklären, vorausgesetzt, daß die gemachten Annahmen zutreffend sind.

Ferner gelingt die Ableitung von Avogadros' Gesetz und damit die Begründung der Molekulargewichtsbestimmung aus der Dampfdichte (Effusion), sowie aus dem osmotischen Druck und den damit zusammenhängenden Erscheinungen.

Das Gas sei in einen würfelförmigen Behälter von 1 m Seitenlänge eingeschlossen. Ein Molekül von der Masse m Hyl bewege sich mit der Geschwindigkeit c Meter pro Sekunde senkrecht gegen die eine Seitenfläche. Beim Aufstoßen wird ihm zunächst die Geschwindigkeit c entzogen, sodann dieselbe Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung erteilt. Die Geschwindigkeitsänderung bei einem Zusammenstoß ist also $2c$. Zwischen zwei Stößen legt das Molekül, da es an der entgegengesetzten Seite abprallt und wieder gegen die erste Seite geworfen wird, den Weg 2 m zurück, die Zahl der Zusammenstöße mit der ersten Seitenfläche beträgt also $c/2$ pro Sekunde und die gesamte Änderung der Geschwindigkeit pro Sekunde $2c.c/2 = c^2$. Der Druck, den das Molekül durch seine fortgesetzten Stöße auf die Seitenfläche ausübt, beträgt somit $m.c^2$ Kilogramm. Da alle Bewegungsrichtungen gleichmäßig vertreten sind, kann man annehmen, je ein Drittel der Moleküle bewege sich senkrecht zu einer der drei Seitenpaare. Ist also N die Gesamtzahl der Moleküle im 1 cbm messenden Würfel, so stoßen auf die betrachtete Seitenfläche $N/3$ Moleküle, der Druck beträgt somit $p = {}^1/_3\, N.m.c^2$ Kilogramm pro Quadratmeter (da die Seitenfläche = 1 qm). $N.m$ ist nun aber die gesamte Masse des Gases pro Cubikmeter, d. h. dessen Dichte in Hyl pro Cubikmeter, welche mit ϱ bezeichnet werden möge. Es ist also

$$p = {}^1/_3 . \varrho . c^2 \text{ Kilogramm pro Quadratmeter.}$$

Hieraus folgt ohne weiteres das Boyle-Mariottesche Gesetz, indem man beiderseits mit dem Volumen v multipliziert:

$$p . v = {}^1/_3 . \varrho . v . c^2 = Const,$$

denn $\varrho . v$ ist die Masse des Gases, die immer dieselbe bleibt, und c die Geschwindigkeit, die sich bei konstanter Temperatur, wie sie das Gesetz voraussetzt, ebenfalls nicht ändert.

Um das Charles-Gay-Lussacsche Gesetz abzuleiten, genügt die Annahme, die absolute Temperatur τ sei proportional der kinetischen Energie der Moleküle. Denn dividiert man die obige Gleichung mit τ, so folgt:

$$\frac{p \cdot v}{\tau} = {}^1/_3 \frac{m \cdot N \cdot v \cdot c^2}{\tau} = a \cdot Nv = Const,$$

denn $\tau = const \cdot \frac{m c^2}{2} = {}^1/_3 \, a \cdot mc^2$, wenn a eine passende Konstante bedeutet, und Nv ist die Gesamtzahl der Moleküle, die natürlich bei den Zustandsänderungen des Gases dieselbe bleibt.

Hat man gleiche Volumina, z. B. zwei Würfel von 1 m Seite von verschiedenen Gasen, welche bezw. N_1 und N_2 Moleküle enthalten sollen, und sind die Drucke p_1 und p_2, sowie die Temperaturen τ_1 und τ_2 bei beiden Gasen dieselben, so ist, wenn m_1, c_1 und m_2, c_2 die Massen bezw. Geschwindigkeiten der Moleküle bedeuten:

$$p_1 = p_2 \quad \text{oder} \quad {}^1/_3 \cdot m_1 N_1 c_1^2 = {}^1/_3 \cdot m_2 N_2 c_2^2,$$

$$\tau_1 = \tau_2 \quad \text{oder} \quad {}^1/_2 \cdot m_1 c_1^2 = {}^1/_2 \cdot m_2 c_2^2,$$

somit

$$N_1 = N_2,$$

d. h. die beiden Gasmengen enthalten gleichviel Moleküle pro Cubikmeter. (Avogadros Gesetz.)

Die Molekulargewichte zweier Gase verhalten sich hiernach wie ihre spezifischen Gewichte (Dampfdichten). Das Molekulargewicht des Sauerstoffs wird = 32 gesetzt, seine Dichte bezüglich der Luft ist 1,1053, das Molekulargewicht eines Dampfes von der Dichte δ ist also bestimmt durch

$$M : 32 = \delta : 1{,}1053 \quad \text{oder} \quad M = \frac{32}{1{,}1053} \cdot \delta = 28{,}95\, \delta.$$

Umgekehrt ist $\delta = M/28{,}95$. Die so berechnete Dampfdichte heißt die theoretische Dampfdichte.

Beispielsweise wurde bei Anwendung eines Ballons von 8,2 Liter Inhalt gefunden: Gewicht der Luft 9,8 g, Gewicht der Kohlensäure 16 g, somit Dichte der letzteren 16/9,8 = 1,64 und deren Molekulargewicht 1,64 . 28,9 = 47.

Als Beispiel eines Dampfes soll das Molekulargewicht des Benzols durch das V. Meyersche Verfahren der Dampfdichtebestimmung (S. 1098) ermittelt werden. Die Dampfdichte = Dampfgewicht : Luftgewicht. Die in dem Fläschchen abgewogene Benzolmenge betrug 0,26 g, die Menge der verdrängten Luft 80 ccm bei 18°, und der Barometerstand 759 mm, welcher mit Rücksicht auf die entgegenwirkende Dampftension der Luftfeuchtigkeit im Meßrohr um 18 mm zu vermindern war. Demgemäß ist das Luftgewicht $80 \cdot \frac{273}{291} \cdot \frac{741}{760} \cdot 0{,}001\,29 = 0{,}094$ g und die Dampfdichte 0,26 : 0,094 = 2,45, also das Molekulargewicht 2,45 . 28,9 = 72. Da Benzol = C_6H_6, muß das Molekulargewicht in Wirklichkeit sein: 6 . 12 + 6 = 78.

Da 1 Liter Sauerstoff normal 1,429 g wiegt, ist das Volumen von 1 Mol (= Grammmolekül) Sauerstoff, also nach dem Avogadroschen Gesetz das Molvolum jedes Gases = 32/1,429 = 22,4 Liter. Auf 1 Liter komprimiert bei 0° würde sein Druck 22,4 Atm. betragen, bei t^0 22,4 $(1 + \alpha t)$ Atm.

Tritt mit steigender Temperatur Dissoziation ein (S. 1059), so wird nach dem Avogadroschen Gesetz die wirkliche Dampfdichte d kleiner als die theoretische d_0.

Unter Dissoziationsgrad versteht man das Verhältnis der Zahl der Moleküle, welche sich gespalten haben, zu der ursprünglichen Gesamtzahl. Er ist beim Zerfall in zwei Moleküle $d_0/d - 1$, beim Zerfall in n Moleküle $(d_0/d - 1) . 1/(n - 1)$.

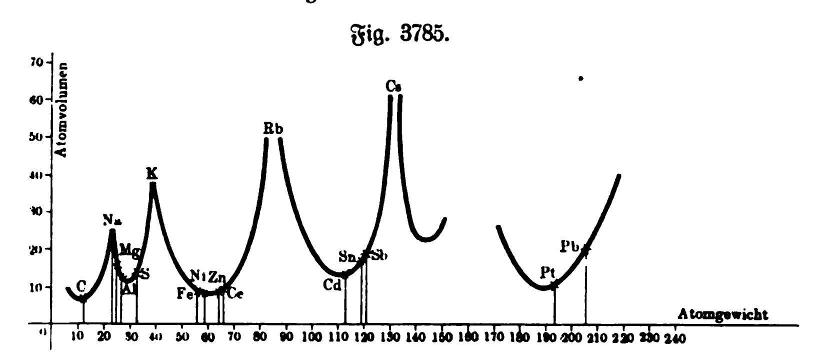
722. **Atom und Molekel** (Stöchiometrie). 1 Liter Chlor verbindet sich mit 1 Liter Wasserstoff zu 2 Liter Chlorwasserstoff. Nach dem Avogadroschen Gesetz ist dies nicht möglich, wenn die Gase aus einzelnen Atomen bestehen und diese sich paarweise verbinden, denn dann dürfte das Volumen des entstehenden Chlorwasserstoffs nur 1 Liter betragen.

Man muß also annehmen, daß die Moleküle von Chlor und Wasserstoff aus je zwei Atomen bestehen und sich bei der chemischen Verbindung spalten, so daß 1 Mol. Chlor + 1 Mol. Wasserstoff = 2 Mol. Chlorwasserstoff. Demgemäß ist das Molekulargewicht von Chlor und von Wasserstoff doppelt so groß als das Atomgewicht.

1 Liter Quecksilberdampf gibt mit 1 Liter Chlor 1 Liter Sublimatdampf ($HgCl_2$). Hieraus ist zu schließen, daß der Dampf von Quecksilber einatomig ist und jedes Atom sich mit zwei Chloratomen verbindet.

Das Gesetz der multiplen Proportionen lehrt, daß unter Umständen auch mehrere Atome sich vereinigen können, z. B. Hg_2Cl_2, doch hat im allgemeinen jedes Atom eine bestimmte Wertigkeit, d. h. es kann nur eine bestimmte Zahl Wasserstoffatome oder anderer einwertiger Atome binden.

Fig. 3785.



723. **Atomvolumina, periodisches Gesetz.** Bringt man die Atomgewichte in Verbindung mit dem Atomvolumen, indem man für jedes chemische Element mittels des bekannten spezifischen Gewichtes das Volumen einer Anzahl Gramme, welche dem Atomgewicht gleich ist, bestimmt und die gefundenen Atomvolumina der verschiedenen Elemente in ein Koordinatensystem einträgt, auf dessen Abszissenachse die Atomgewichte eingetragen sind, so resultiert eine ziemlich regelmäßige wellenförmige Linie, welche darauf hinweist, daß hier irgend eine noch nicht näher erkannte Gesetzmäßigkeit, das periodische Gesetz, vorhanden ist.

Die nachstehende Tabelle gibt eine Zusammenstellung einiger chemischer Grundstoffe, der abgekürzten Zeichen (Symbole) für dieselben, der Atomgewichte, der spezifischen Gewichte und Atomvolumina. Die Fig. 3785 gibt die das periodische Gesetz darstellende Kurve, in welcher der Einfachheit halber nur einzelne Symbole eingetragen sind.

Elemente	Symbol	Atom-gewicht	Spez. Gewicht	Atom-volumen	Elemente	Symbol	Atom-gewicht	Spez. Gewicht	Atom-volumen
Wasserstoff . .	H	1,00	—	—	Nickel	Ni	58,3	8,8	6,6
Lithium . . .	Li	6,98	0,59	11,8	Kobalt	Co	58,56	8,5	6,9
Bor	B	10,9	2,68	4,01	Kupfer	Cu	63,1	8,9	7,1
Kohlenstoff . .	C	11,91	3,3	3,6	Zink	Zn	64,9	7,15	9,1
Stickstoff . . .	N	13,93	3?	5?	Arsen	As	74,4	5,67	13,1
Sauerstoff . .	O	15,88	2?	8?	Selen	Se	78,6	4,6	17,0
Fluor	F	18,9	1,5?	13?	Brom	Br	79,36	2,97	26,7
Natrium . . .	Na	22,88	0,97	23,6	Strontium . .	Sr	86,94	2,50	34,8
Magnesium . .	Mg	24,18	1,74	13,9	Silber	Ag	107,12	10,5	10,2
Aluminium . .	Al	26,9	2,56	10,5	Cadmium . . .	Cd	111,6	8,65	12,8
Silicium . . .	Si	28,2	2,49	11,3	Zinn	Sn	118,1	7,29	16,2
Phosphor . . .	P	30,77	2,3	13,4	Antimon . . .	Sb	119,3	6,7	17,8
Schwefel . . .	S	31,83	2,04	15,6	Jod	J	125,90	4,94	25,5
Chlor	Cl	35,18	1,38	25,5	Baryum . . .	Ba	136,4	3,75	36,5
Kalium	K	38,86	0,86	45,2	Platin	Pt	193,3	21,50	9,0
Calcium . . .	Ca	39,8	1,57	25,3	Gold	Au	195,7	19,3	10,01
Chrom	Cr	51,7	6,8	7,6	Quecksilber . .	Hg	198,5	13,59	14,6
Mangan . . .	Mn	54,6	8,0	6,8	Blei	Pb	205,35	11,38	18,0
Eisen	Fe	55,5	7,8	7,1	Wismut . . .	Bi	206,9	9,82	21,1

Beispielsweise finden wir auf der horizontalen Linie im Abstande 32 vom Nullpunkte (an der „Abszisse“ 32) eine senkrechte, mit S bezeichnete Linie („Ordinate“) von der Höhe 16 abgetragen. Dies heißt, das Atomvolumen des Schwefels, dessen Atomgewicht 32 beträgt, ist 16. Das Atomvolumen des Kupfers würde bei der Abszisse 63 einzutragen sein und ergäbe sich aus dem Verlauf der Kurve $= 8$.

In ähnlicher Weise wie für einfache Stoffe oder Elemente das Atomvolumen bestimmt wird, kann man für zusammengesetzte Stoffe das **Molekularvolumen** bestimmen. Beispielsweise findet sich aus dem Molekulargewichte von Kupfersulfid, welches (da $Cu = 63$ und $S = 32$) beträgt: $63 + 32 = 95$, und aus dem spezifischen Gewicht, welches 4,0 beträgt, das Volumen von 1 cdm $= 0{,}25$, somit das Molekularvolumen $= 95 \times 0{,}25 = 24$ rund.

Man könnte erwarten, daß dasselbe gleich der Summe der Atomvolumina ist. Diese ist in der Tat $8 + 16 = 24$.

Kupfersulfür hat das Molekulargewicht $2 \times 63 + 32 = 126 + 32 = 158$ und das spezifische Gewicht 5,6, somit ist das Molekularvolumen $= \frac{158}{5{,}6} = 28{,}2$. Die Summe der Atomvolumina beträgt $2 \times 8 + 16 = 16 + 16 = 32$. In diesem Falle ist somit die Übereinstimmung weniger gut. Man erklärt dies dadurch, daß die Atomvolumina und Molekularvolumina nicht den wirklich von den Atomen und Molekülen eingenommenen Räumen proportional sein können, da bei der Bestimmung des Gewichtes der Volumeneinheit (des spezifischen Gewichtes) nicht das Volumen der Atome allein, sondern auch das der Zwischenräume zwischen denselben gemessen wird.

724. **Atomwärme und Molekularwärme.** Dulong und Petit (1819) fanden, daß das **Produkt**, welches man erhält, wenn man die **spezifische Wärme** s

eines starren Elementes mit seinem Atomgewichte p multipliziert, die sogenannte Atomwärme, stets sehr nahe den Wert 6,5 habe.

Für diejenigen Elemente, für die das Gesetz bei gewöhnlicher Temperatur nicht zutrifft, wird es, infolge der Veränderlichkeit der spezifischen Wärme mit der Temperatur, gültig in der Nähe des absoluten Nullpunktes. Selbst für Gase scheint dies zuzutreffen, während bei Flüssigkeiten die Verhältnisse verwickelter sind. Das Gesetz macht es möglich, das Atomgewicht eines Körpers aus seiner spezifischen Wärme wenigstens annähernd zu berechnen, also auch die auf anderem Wege gefundenen Werte des Atomgewichtes zu kontrollieren.

Für zusammengesetzte Körper gilt das Gesetz von Neumann: Die Molekularwärme, d. h. das Produkt von Molekulargewicht und spezifischer Wärme, ist gleich der Summe der Atomwärmen. So besteht z. B. ein Molekül Kupferglanz aus zwei Atomen Kupfer und einem Atom Schwefel; wir haben also für Kupferglanz die Molekularwärme

$$= 2 . 6{,}02 + 5{,}68 = 17{,}72,$$

während der Versuch 19,1 ergibt.

725. **Isomerie.** Nach dem Gesetz der multiplen Proportionen wäre es möglich, daß auch je zwei Kupferatome mit je zwei Schwefelatomen sich vereinigen könnten, welche Verbindung mit dem Symbol Cu_2S_2 zu bezeichnen wäre. In derselben würden 2 × 63 Gewichtsteile Kupfer mit 2 × 32 Gewichtsteilen Schwefel verbunden sein, d. h. auf 63 Teile Kupfer kämen 32 Teile Schwefel, genau wie beim Kupfersulfür CuS. Zwei Körper können deshalb genau dieselbe prozentische Zusammenstellung haben und doch in ihrem Wesen, somit ihren Eigenschaften, vollständig verschieden sein. Diese Erscheinung, welche tatsächlich beobachtet werden kann, nennt man Isomerie, und speziell den eben betrachteten Fall, wobei die Moleküle der einen Substanz ein Vielfaches der Atomzahl der Moleküle der anderen enthalten, Polymerie.

Zwei Körper können nämlich auch isomer sein, ohne zugleich polymer zu sein. Beispielsweise könnten die vier Atome der Verbindung Cu_2S_2 zu einem Quadrat gruppiert sein oder drei derselben zu einem gleichseitigen Dreieck, in dessen Mitte sich das vierte Atom befindet. Auch in diesem Falle müßten die Eigenschaften der beiden Modifikationen verschieden sein, obschon die Atomzahl im Molekül dieselbe ist. Solche Verschiedenheit nennt man Metamerie.

Die Verschiedenheit der isomeren Körper tritt insbesondere in ihrem chemischen Verhalten zu Tage, d. h. in ihrer Fähigkeit, sich mit anderen Körpern zu verbinden oder chemisch umzusetzen. Die organische Chemie liefert eine große Menge von Beispielen hierfür, und es wäre ohne Zuhilfenahme der Theorie der Isomerie kaum möglich, die Körper zu benennen und die Erscheinungen zu beschreiben.

In manchen Fällen zeigt sich aber auch eine unzweifelhafte Stoffverschiedenheit ohne gleichzeitige Verschiedenheit der chemischen Eigenschaften. (Vgl. Enantiotropie, S. 1138, und Monotropie, S. 1140.)

Diese auffallende Erscheinung hat Anlaß gegeben, außer der schon besprochenen chemischen Isomerie auch eine physikalische Isomerie anzunehmen.

Man nimmt an, die chemischen Moleküle, welche wir bisher betrachtet haben, seien nicht die kleinsten Teilchen, welche noch die Eigenschaften des betreffenden Körpers besitzen, sondern größere Gruppen derselben, die physikalischen

Moleküle. Durch mechanische Zerteilung eines Körpers würden wir nicht zu chemischen, sondern nur zu physikalischen Molekülen gelangen können.

726. Molekulargeschwindigkeit. Die Größe der mittleren Molekulargeschwindigkeit folgt aus der Formel $c = \sqrt{\frac{3p}{\varrho}}$ m pro Sekunde, wobei p den Druck in Kilogrammen pro Quadratmeter und ϱ die Dichte in Hyl pro Cubikmeter bedeutet.

Beispielsweise ist für Luft im Normalzustande $p = 10\,330$ kg pro Quadratmeter und $\varrho = \frac{1,29}{9,81}$ Hyl pro Cubikmeter.

Indes ist Luft kein einfaches Gas. Für solche findet sich in Meter-Sekunden für:

Wasserstoff	Stickstoff	Sauerstoff	Kohlensäure
1844,	492,	461,	392.

727. Effusion der Gase (vgl. S. 1446). Bezüglich der Effusionsgeschwindigkeiten, welche natürlich den Molekulargeschwindigkeiten proportional sind, ergibt sich aus $p_1 = p_2$, wenn ϱ_1 und ϱ_2 die Dichten:

$$\tfrac{1}{3} \cdot \varrho_1 \cdot c_1^2 = \tfrac{1}{3} \cdot \varrho_2 \cdot c_2^2$$

oder

$$c_1 : c_2 = \sqrt{\varrho_2} : \sqrt{\varrho_1},$$

d. h. sie sind den Quadratwurzeln aus den Dichten umgekehrt proportional.

Durch Effusionsversuche kann man also die Gasdichte und damit auch das Molekulargewicht bestimmen.

728. Einfluß der Temperatur. Da die Dichte des Gases mit der Temperatur entsprechend dem Gay-Lussacschen Gesetz abnimmt, ändert sich auch die Molekulargeschwindigkeit mit der Temperatur und zwar proportional der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur.

Fig. 3786.



In auffälliger Weise kommt diese Zunahme zur Geltung bei den modernen Schießwaffen, welche dem Projektil eine Geschwindigkeit zu erteilen vermögen, die größer ist als die Geschwindigkeit, mit welcher sich ein Stoß bei gewöhnlicher Temperatur im Gase fortpflanzt (340 m sec), welche Geschwindigkeit ebenfalls mit der molekularen Geschwindigkeit zusammenhängt. Die Projektilgeschwindigkeit kann natürlich nicht größer sein als die der stoßenden Moleküle[1]).

729. Weglänge, Stoßzahl und Molekulardurchmesser. Die Reibung, welche zwei mit verschiedener Geschwindigkeit aneinander gleitende Gasschichten aufeinander

[1]) Fig. 3786 zeigt eine Selbstladepistole der Deutschen Waffen- und Munitionsfabriken Berlin NW. 7, Dorotheenstr. 43/44, welche 350 m Anfangsgeschwindigkeit erzeugt.

ausüben, kann man erklären durch das Hineindiffundieren der langsamer bewegten Moleküle in die rascher gleitende Schicht, insofern sie die Schicht verzögern und umgekehrt. Sie muß deshalb proportional sein der Größe der Fläche und der Geschwindigkeitsdifferenz.

Die Unabhängigkeit von der Dichte (vgl. S. 1451) ergibt sich daraus, daß z. B. bei dreifacher Dichte wohl die Menge der diffundierenden Moleküle die dreifache wird, aber auch die Masse, auf welche sie beschleunigend oder verzögernd wirken. Die Zunahme der Reibung mit der Temperatur ist natürlich die Folge der erhöhten Molekulargeschwindigkeit. Genauer ist die innere Reibung der Gase proportional ihrer Dichte δ, der molekularen Geschwindigkeit V und der mittleren Weglänge L, speziell ist der Reibungskoeffizient $\varrho = \frac{1}{3} . \delta . V . L$ Dynen pro Quadratcentimeter bei der Geschwindigkeitsdifferenz von 1 cm/sec pro Centimeter.

Man ist somit im stande, die mittlere Weglänge aus dem Reibungskoeffizienten zu berechnen. Sie ergibt sich bei 0° für Wasserstoff 0,000 185 5; Sauerstoff 0,000 105 9 und Stickstoff 0,000 098 6 mm; die mittlere Stoßzahl für Wasserstoff 9480; Sauerstoff 4065 und Stickstoff 4760 Millionen.

Aus diesen Werten ließen sich im Prinzip die Diffusionskoeffizienten berechnen, doch ergeben sich Schwierigkeiten, da die molekularen Weglängen bei der Mischung der Gase andere werden.

Aus der mittleren molekularen Weglänge ergibt sich weiter der Moleculardurchmesser und die Anzahl der Moleküle in der Raumeinheit, wenn man die auf S. 1111 besprochene van der Waalssche Ansicht zugrunde legt, daß der Vorgang der Kondensation eines Dampfes darin besteht, daß sich die Moleküle dicht aneinander legen, so daß das spezifische Volumen der Flüssigkeit im wesentlichen durch den Molekulardurchmesser, das des Dampfes durch die mittlere Weglänge bestimmt wird.

Der Durchmesser eines Moleküls wäre für Wasserstoff etwa gleich $1{,}4 . 10^{-7}$ mm, d. h. etwas mehr als ein 10 milliontel Millimeter anzunehmen. 1 mg Wasserstoff müßte aus etwa 140 Trillionen Molekülen bestehend gedacht werden, 1 cbmm enthielte 6800 Billionen Moleküle.

Nach Avogadros Satz muß die Zahl der Moleküle für jedes andere Gas unter gleichen Umständen dieselbe sein. Man kann also sagen, jedes Gas enthält pro Cubikcentimeter etwa 21 Trillionen Moleküle in 3 bis 4 milliontel Millimeter Abstand. 10 Trillionen Luftmoleküle wiegen 1 mg.

Verdünnt man die Luft auf 1 milliontel, die äußerste praktisch erreichbare Grenze, so enthält ein Raum, der vorher von 1 Quadrillion Molekülen erfüllt war, immer noch 1 Trillion. Hierdurch erklärt sich der Kundtsche Versuch, S. 1450, daß selbst in sehr hohem Vakuum noch deutliche Gasreibung auftritt. Die nähere Untersuchung hat ergeben, daß dieselbe teilweise eine gleitende Reibung der Moleküle an den festen Wänden ist [1]).

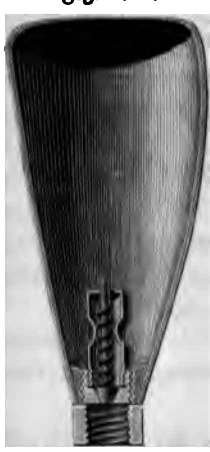
730. Die Betrachtungen von Robert Mayer. Bereits oben (S. 1107) wurde hingewiesen auf die scheinbar rätselhafte Energieerzeugung bei einer Dampfmaschine. Einfacher liegt der Fall bei einem Druckluftmotor (S. 984), noch einfacher bei der Wind-

[1]) Siehe auch O. E. Meyer, Die kinetische Theorie der Gase. Breslau 1899, Maruschke u. Berendt und L. Boltzmann, Vorlesungen über Gastheorie, 204 S. Leipzig 1895, J. A. Barth.

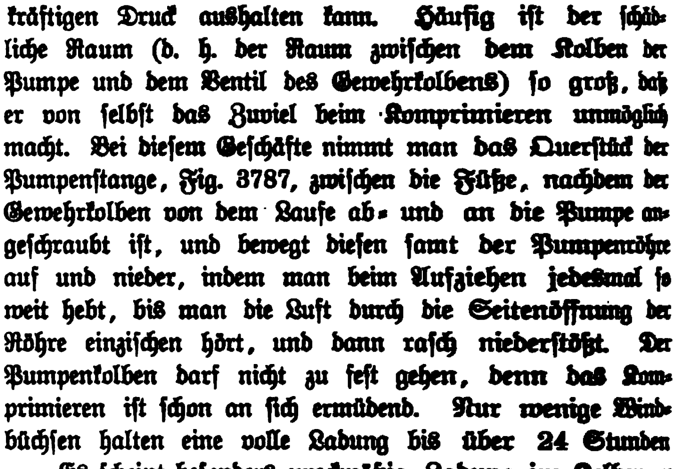
büchse (Fig. 3787). Ist dieselbe auch kein physikalischer Apparat, so kann sie doch zur Erläuterung der in Betracht kommenden Vorgänge mit Vorteil beigezogen werden.

Das Laden des Kolbens erfordert immer einige Vorsicht. Wenn man daher nicht weiß, wie viele Pumpenstöße ein solches Instrument erträgt, so ist es am ratsamsten, Kolben und Pumpe mit Öl zu füllen und zu versuchen, ob es

Fig. 3787.







kräftigen Druck aushalten kann. Häufig ist der schädliche Raum (d. h. der Raum zwischen dem Kolben der Pumpe und dem Ventil des Gewehrkolbens) so groß, daß er von selbst das Zuviel beim Komprimieren unmöglich macht. Bei diesem Geschäfte nimmt man das Querstück der Pumpenstange, Fig. 3787, zwischen die Füße, nachdem der Gewehrkolben von dem Laufe ab- und an die Pumpe angeschraubt ist, und bewegt diesen samt der Pumpenröhre auf und nieder, indem man beim Aufziehen jedesmal so weit hebt, bis man die Luft durch die Seitenöffnung der Röhre einzischen hört, und dann rasch niederstößt. Der Pumpenkolben darf nicht zu fest gehen, denn das Komprimieren ist schon an sich ermüdend. Nur wenige Windbüchsen halten eine volle Ladung bis über 24 Stunden. Es scheint besonders zweckmäßig, Ladung im Kolben zu lassen, wenn man das Instrument wieder auf ein Jahr bei Seite stellt. Wenn der Kolben angepumpt und der Lauf wieder aufgeschraubt ist, so bringt man zuerst einen leichten Papierpfropf in den Lauf und erst auf diesen die Kugel. Der Abzug ist wie bei einem gewöhnlichen Flintenschloß eingerichtet [1]).

Ein bekanntes hierher gehöriges Spielzeug ist auch das Blasrohr, dessen Prinzip im großen angewendet ist bei der Rohrpost, bei den Geschützen zum Lanzieren der Torpedos u. s. w.

Man könnte annehmen, daß beim Laden einer Windbüchse oder beim Füllen eines Druckluftkessels die geleistete Arbeit aufgespeichert werde als potentielle Energie ähnlich wie beim Aufziehen einer Federbüchse oder eines Federmotors. Dies widerspricht aber vollkommen den Annahmen der kinetischen Gastheorie, welchen zufolge die Moleküle keine Kräfte aufeinander ausüben, und ganz besonders auch dem Faktum, daß beim Komprimieren eines Gases eine beträchtliche Wärmemenge auftritt, d. h. eine Erhöhung der molekularen Geschwindigkeit, welche bei der Expansion wieder vollständig verschwindet, so daß es den Anschein hat, daß die bei der Kompression verloren gehende Bewegungsenergie sich vollständig wieder finde in dem Zuwachs an unsichtbarer molekularer Bewegungsenergie.

[1]) Luftgewehre und -pistolen (Preis 30 bis 80 bezw. 4 bis 8 Mk.), welche nicht speziell zur Demonstration, sondern zum Üben im Schießen bestimmt sind und durch wenige Griffe geladen werden, liefert in großer Auswahl das Eisenwerk Gaggenau (bei Rastatt). Ferner sind solche zu beziehen, einschließlich 500 Kugeln und 1 Dutzend Bolzen, zu 12,50 Mk. von Gotth. Hayn, Breslau, 2 Z.

Zur Demonstration dieser Wärmewirkungen eignet sich besonders das **pneumatische Feuerzeug**, Fig. 3788 (Lb, 15), sowie die **Kompressionspumpe** mit eingesetztem Metallthermometer (Fig. 3789 K, 135). (Vergl. § 481, S. 1198).

Beim Gebrauch des pneumatischen Feuerzeugs muß man vor jedem Versuch ein neues Stückchen trockenen faserigen Zunders in die Höhlung des Kolbens einlegen und frische Luft durch den Cylinder blasen. Ferner muß der Kolben, sowie die Dichtung des Unterteils, jedesmal vor dem Gebrauch mit feinem Maschinenöl angefeuchtet werden.

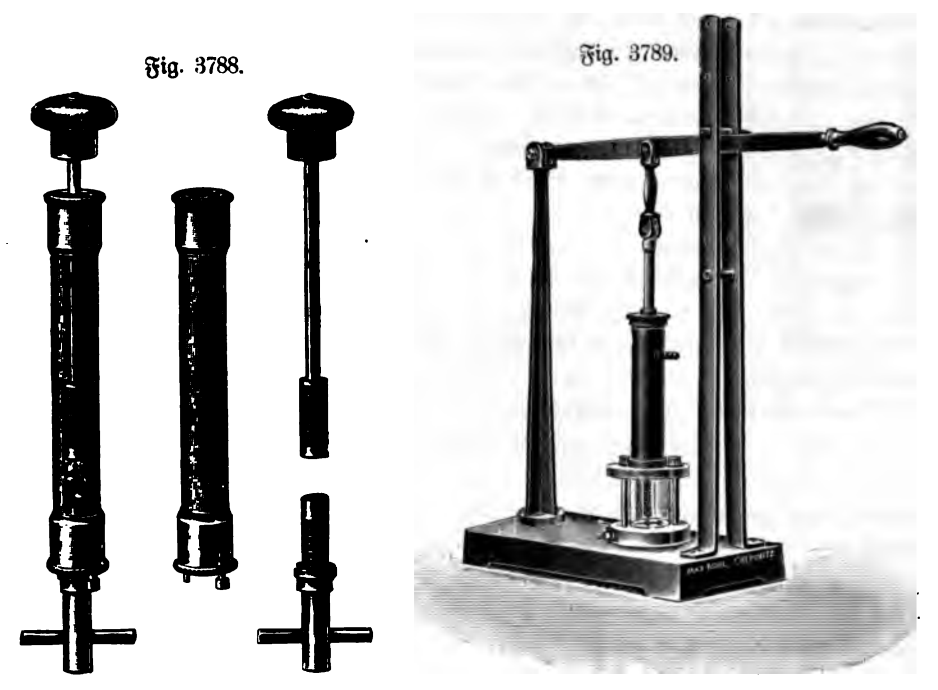


Fig. 3788.

Fig. 3789.

Letzterer wird nach dem Einsetzen etwas gedreht, wobei er durch einen Schraubenkopf gehalten wird, so daß er nicht herausgedrückt werden kann. Das Glasrohr hält man mit der linken Hand senkrecht auf einen starken Tisch, bringt mit der rechten Hand den Kolben in die obere Öffnung und drückt den Kolben nun mit beiden Händen kräftig in das Glasrohr. Man sieht die auftretende Feuererscheinung im Innern des Rohres und kann nun, während die rechte Hand das Feuerzeug am Griffe des Kolbens festhält, mit der linken den Unterteil herausziehen (Drehung!) und den brennenden Feuerschwamm vorzeigen.



Fig. 3790.

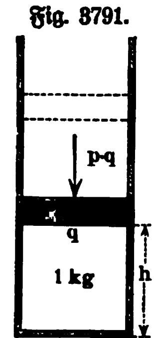
Zur Demonstration der Abkühlung bei der Expansion kann ein starkwandiges Gefäß mit Hahn dienen (Fig. 3790 K, 24) welches man mittels der Kompressionspumpe füllt und, nachdem es sich wieder abgekühlt hat, gegen die Kugel eines Luftthermoskops entleeren läßt. In auffälligerer Weise natürlich läßt sich die Erscheinung bei Anwendung des früher (S. 1200) besprochenen Kompressors in Verbindung mit einem Druckluftkessel zeigen, oder bei Anwendung einer mit hochkomprimierter Luft gefüllten Stahlflasche. (Anwendung: **Windhausens** Kaltluftmaschine.)

Auf Grund der dargelegten Erwägungen gelangte **Robert Mayer** zu dem Ergebnis, daß das mechanische Wärmeäquivalent, d. h. die Anzahl Kilogrammeter,

welche einer Kalorie äquivalent sind, gleich sein muß dem Quotienten der sog. Gaskonstante, bezogen auf 1 kg (Konstante des Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetzes), dividiert durch die Differenz der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und konstantem Volumen, welcher Quotient übereinstimmend für alle Gase etwa gleich 427 ist.

In einem Zylinder (Fig. 3791) sei durch einen beweglichen, dichtschließenden Kolben 1 kg Luft abgegrenzt. Bei 0° C, d. h. 273° absolut, sei die Höhe des Kolbens über dem Boden = h Meter. Hält man den Kolben fest und erwärmt auf 273°, d. h. 546° absolut, so beträgt die dem Gase zugeführte Wärmemenge $c_v . 273$ Kalorien. Läßt man den Kolben los, so kühlt sich das Gas infolge der Expansion ab, man muß also noch mehr Wärme zuführen, um die Temperatur konstant auf 546° zu halten. Bei dem konstanten Drucke von 760 mm = p Kilogramm pro Quadratmeter, also $p.q$ Kilogramm auf den Kolben, dessen Querschnitt q Quadratmeter sei, erreicht der Kolben nach dem Gay-Lussacschen Gesetze in der Höhe $2h$ seine endgültige Lage. Die dabei geleistete Arbeit beträgt $p.q.h = p.v$ Kilogrammeter, wenn v das Volumen bezeichnet. Die Wärme, die man nachträglich noch zuführen mußte, ist $c_p . 273 - c_v . 273$; entsprechen also x Kilogrammeter einer Kalorie, so muß sein: $(c_p - c_v) . 273 . x = p . v$, also:

Fig. 3791.



$$x = \frac{p . v}{273} \cdot \frac{1}{c_p - c_v} = \frac{R}{c_p - c_v},$$

wenn R die Konstante des Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetzes für 1 kg Gas bezeichnet.

Für Luft ist $c_p - c_v = 0{,}237 - 0{,}168 = 0{,}069$, ferner das Volumen von 1 kg bei 0° und 760 mm Druck $v = 1/1{,}293$, somit, da $p = 10\,334$ kg pro Quadratmeter:

a) Technisch:

$$R = \frac{10\,334}{1{,}293 . 273} = 29{,}32$$

und $x = \dfrac{29{,}32}{0{,}069} = 427$ Kilogrammeter pro Kalorie.

b) Absolut[1]):

$$R = \frac{1\,013\,200}{0{,}001\,293 . 273} = 2\,870\,000 \text{ cm}^2 \text{g sec}^{-1}$$

und $x = \dfrac{2\,870\,000}{0{,}069} = 41\,900\,000 \text{ cm}^2 \text{g sec}^{-2}$,

d. h. eine Grammkalorie ist äquivalent 41 900 000 (rund 42 Millionen) Erg oder der Hubarbeit von 427 g auf 1 m Höhe. Umgekehrt ist $239 . 10^{-10}$ das Wärmeäquivalent des Erg in Grammkalorien.

Völlig konstant ist der technische Wert des Wärmeäquivalents 427 nicht, weil eine Kalorie eine bestimmte Energiemenge ist, der Wert des Kilogrammeters dagegen sich von Ort zu Ort ändert[2]). Will man eine feste Zahl gewinnen, so muß man

[1]) Der Druck von 1 cm Quecksilber ist = 13,596 . 980,6 = 13332 und 1 Atm. = 76 . 13 332 = 1 013 200 Dynen pro Quadratmeter. — [2]) Z. B. bei Anwendung von Karlsruher Maß = 426,88, bei Petersburger Maß = 426,45, bei Madrider Maß = 427,23 u. s. w.

entweder festsetzen, daß das Kilogramm gemeint sein soll für 45° geographischer Breite und für Meereshöhe, wobei sich nach Regnault und Moorby (Beibl. 23, 469, 1899) die Zahl 426,58 ergibt, oder man muß Erg als Energieeinheit benutzen, wobei sich ergibt, daß eine (große) Kalorie gleich 41 830 Millionen Erg ist.

Nach Warburg (Beibl. 24, 419, 1900) ist die 15°-Kalorie, d. h. die Wärme, die ein Gramm Wasser von $14^1/_2{}^0$ auf $15^1/_2{}^0$ nach dem Wasserstoffthermometer erwärmt, im Mittel 41 890 000 Erg.

Ist die mechanische Wärmetheorie zutreffend, so ist eigentlich die Kalorie als Wärmeeinheit überflüssig, man kann Wärmemengen ebenso wie potentielle und kinetische Energie in Erg oder in Kilogrammetern messen. Die Wärmemenge, welche durch eine Leistung von 1 Watt pro Sekunde, d. h. 1/g kgm pro Sekunde hervorgebracht wird, d. h. 10^7 Erg/sec bezeichnet man auch (ziemlich überflüssiger Weise) als 1 Joule. Eine 15°-Kalorie = 4,189 Joule. 1 Grammkalorie ist nach obigem = 4,19 Wattsekunden (Joule)[1]).

Um Robert Mayers Gedankengang noch mehr zu verdeutlichen, pflege ich das mechanische Wärmeäquivalent mittels eines Druckluftmotors zu bestimmen. Die von demselben geleistete Arbeit wird gemessen mit einer Bandbremse, die verbrauchte Wärmemenge[2]) durch Bestimmung der Lufttemperatur beim Eintritt und Austritt und Messung des Luftquantums pro Sekunde mittels einer Gasuhr. Als Thermometer dienen Luftthermoskope. Ein wesentlicher Fehler entsteht dabei dadurch, daß die Luft nicht ohne Bewegungsenergie den Motor verläßt. Aus diesem Grunde muß mindestens hinter dem Motor ein größerer Kessel angebracht werden, in welchen die Geschwindigkeit der Luftströmung auf verschwindend kleines Maß reduziert und dadurch deren Bewegungsenergie wieder in Wärme umgesetzt wird. Zweckmäßig schaltet man einen Luftdruckkessel auch vor den Motor.

Zunächst bestimmt man die Temperatur der austretenden Luft beim Leerlauf, sodann, nachdem die Bremse belastet wurde. Beispielsweise ergab sich beim Durchfluß von 20 Litern in 28 Sekunden eine Abkühlung infolge der Belastung um 10°. Die verschwundene Wärme war also $20/28 \times 0{,}001\,29 . 0{,}23 . 10 = 0{,}001\,89$ Kal. pro Sekunde. Das belastende Gewicht betrug 10 kg, der Radius der Riemenscheibe 0,041, die Anzahl Umdrehungen 100 in 33 Sekunden, somit die geleistete Arbeit $2\pi . 0{,}041 . 10 . 100/33 = 7{,}8$ Kilogrammeter pro Sekunde. Hieraus berechnet sich das mechanische Wärmeäquivalent $x = 7{,}8/0{,}001\,89 = 410$ Kilogrammeter pro Kalorie.

[1]) Man könnte weiter festsetzen: Die Temperatur 1 CGS wird erzeugt, wenn 1 g Wasser von 15° 1 CGS Wärme zugeführt wird. Somit ist 1 Celsiusgrad = 41,9 Millionen CGS oder 1 CGS = 2,4 milliontel Celsiusgrad.

Der Ausdehnungskoeffizient beträgt 1 CGS, wenn eine Erwärmung um 1 CGS den Stab um seine eigene Länge (bezw. den Körper um sein eigenes Volumen) vergrößert.

Die Gaskonstante (d. h. die Konstante R des Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetzes) ist 1 CGS, wenn das Gas bei der absoluten Temperatur 1 CGS, auf den Raum von 1 CGS (1 ccm) gebracht, den Druck 1 CGS (1 Dyne pro Quadratcentimeter) ausübt.

Die latente Wärme ist 1 CGS, wenn zur Umwandlung von 1 g des betreffenden Stoffes die Wärmemenge 1 CGS erforderlich ist.

Die Änderung der Umwandlungstemperatur durch Druck (Siede-, Schmelztemperatur u. s. w.) beträgt 1 CGS, wenn der Druck 1 CGS eine Zunahme um 1 CGS bewirkt. Die Volumenänderung durch Umwandlung beträgt 1 CGS, wenn die Volumenzunahme bei der Umwandlung von 1g 1 ccm beträgt u. s. w.

[2]) Sie ist bei größeren Motoren so erheblich, daß sich der Motor dicht mit Eis beschlägt und geheizt werden muß.

731. Isothermen und Adiabaten. Dehnt sich ein Gas unter dem konstanten Drucke p aus um das Volumen v, so ist die äußere Arbeit:

a) Technisch:

$$p \,.\, v \text{ Kilogrammeter,}$$

wenn p gemessen wird in Kilogrammen pro Quadratmeter und v in Cubikmetern.

b) Absolut:

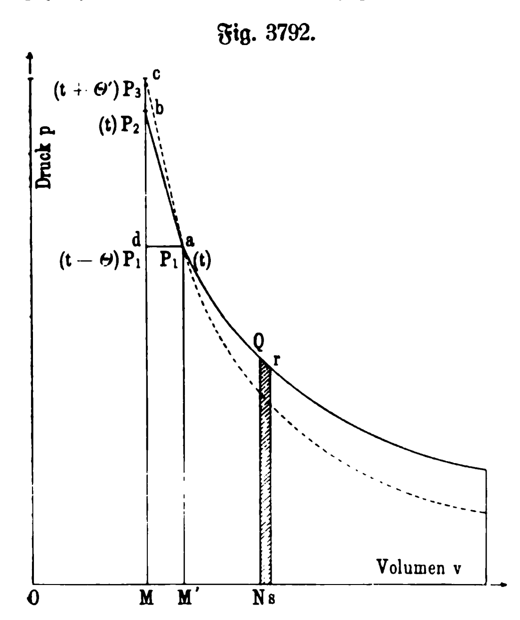
$$p \,.\, v \text{ Erg,}$$

wenn p gemessen in Bar (Dynen pro Quadratcentimeter) und v in Cubikcentimetern.

Wird h in Centimetern Quecksilber gemessen, so ist die Arbeit $13\,332 \,.\, v \,.\, h$ Erg. Eine Cubikcentimeter-Atmosphäre = 13 332 . 76 = 1 013 200 Erg; eine Liter-Atmosphäre = $1013{,}2 \,.\, 10^6$ Erg.

Falls (nach Clapeyron) die Volumina als Abscissen, die Drucke als Ordinaten gezeichnet werden, wie in Fig. 3792, ist die Arbeit für die kleine Volumänderung Ns gegeben durch den Flächenstreifen $NsQr$ und für eine größere Volumänderung durch die Summe dieser Flächenstreifen.

Fig. 3792.



Bei der Entwickelung eines Gases unter konstantem Drucke bei konstanter Temperatur muß in gleicher Weise Arbeit geleistet werden. Sie beträgt für 1 g Luft, wie a. S. 1516 berechnet, $2\,870\,000\,\text{cm}^2/\text{g}/\text{sec}^{-2}$. Gewöhnlich wählt man indes bei chemischen Änderungen 1 Grammolekül, wodurch die Gaskonstante ihren individuellen Charakter verliert, denn jedes Grammolekül oder Mol, z. B. 32 g Sauerstoff oder 2,016 g Wasserstoff, hat unter gleichen Umständen dasselbe Volumen, z. B. bei 0° und 760 mm Druck 22 400 ccm und bei τ^0 (absolut) und p CGS $22\,400 \,.\, 1\,013\,200/p \,.\, \tau/273 = 83\,100\,000\,\tau/p$ ccm. Die bei Vergasung eines Mols geleistete äußere Arbeit beträgt hiernach $831 \,.\, 10^5 \,.\, \tau$ Erg $= 831 \,.\, 10^5 \,.\, \tau/(419 \,.\, 10^5) = 1{,}98 \,.\, \tau$ (oder annähernd $2 \,.\, \tau$) Grammkalorien. Dieselbe ist gleich der Differenz $c_p - c_v$ mal dem Molekulargewicht.

Alle diese Betrachtungen setzen voraus, daß lediglich äußere Arbeit geleistet wird, daß nicht etwa auch innere Arbeit zu leisten ist durch Überwindung von Kräften zwischen den Molekülen, wie sie z. B. bei flüssigen und festen Körpern als Kohäsion auftreten oder bei den Dissoziationserscheinungen als chemische Affinität der Atome.

Durch den Beweis von Joule, daß bei Verbindung eines Kessels mit komprimierter Luft mit einem evakuierten (Fig. 2749, S. 995) die Gesamtwärme sich nicht ändert, ist bewiesen, daß unter gewöhnlichen Umständen innere Arbeit nicht in Betracht kommt, also die einem Gase in Form von Wärme innewohnende Energie, falls keine äußere Arbeit geleistet wird, vom Volumen unabhängig ist.

Bleibt die Temperatur konstant, so ist die sich ergebende Druckkurve (Isotherme) nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetze eine gleichseitige Hyperbel. Die bei Expansion zuzuführende, bei Kompression fortzunehmende Wärme bei der kleinen Volumänderung dv beträgt dann

$$\frac{1}{427} \cdot p \cdot dv = \frac{1}{427} \cdot R \cdot \tau \cdot \frac{dv}{v}$$

und (nach Integration) für eine größere Volumänderung von v_0 bis v

$$Q = \frac{1}{427} \cdot R \cdot \tau \cdot \log nat \frac{v}{v_0} \text{ Kalorien}$$

oder

$$Q = \frac{1}{427} \cdot R \cdot \tau \cdot \log nat \frac{p_0}{p} \text{ Kalorien.}$$

Wird dem Gase weder Wärme zugeführt noch entzogen, so erhält man eine steiler verlaufende Kurve (Adiabate), welche in Fig. 3792 punktiert angedeutet ist. Bei Kompression des Gases, z. B. von a, wo der Druck P_1 beträgt, bis c, ist somit ein größerer Druck P_3 erforderlich als der Druck P_2 bei der gleichen Kompression von M' bis M längs der Isotherme bis b, weil infolge der Kompressionswärme die Temperatur von t bis $t + \theta'$ steigt.

Das Verhältnis der Druckzunahme $P_3 - P_1 : P_2 - P_1$ kann man nach Warburg in folgender Weise bestimmen: Man erwärme vom Punkte d, d. h. bei konstantem Volumen M von der Temperatur $t - \theta$ bis c, d. h. bis $t + \theta'$. Hierzu sind, falls die Gasmenge 1 kg beträgt, $c_v(\theta + \theta')$ Kalorien nötig. Dieselbe Wärmemenge ist erforderlich, um das Gas auf anderem Wege in den gleichen Zustand zu versetzen, z. B. über a. Da von d nach a die Erwärmung bei konstantem Drucke erfolgt, ist die Wärmemenge $c_p . \theta$. Von a bis c ist die Zustandsänderung adiabatisch, die Wärme somit 0. Demgemäß ist

$$c_v(\theta + \theta') = c_p . \theta \quad \text{oder} \quad \frac{\theta + \theta'}{\theta} = \frac{c_p}{c_v} = k.$$

Nach Gay-Lussacs Gesetz ist $P_3 = const\,(t + \theta')$, $P_1 = const\,(t - \theta)$ und $P_2 = const . t$, somit $P_3 - P_1 = const\,(\theta' + \theta)$ und $P_2 - P_1 = const\,\theta$ und $(P_3 - P_1) : (P_2 - P_1) = (\theta + \theta') : \theta$, also: $P_3 - P_1 = k . (P_2 - P_1)$; d. h. das Verhältnis der adiabatischen zur isothermen Elastizität (S. 990) ist gleich dem Verhältnis der spezifischen Wärmen für konstanten Druck und für konstantes Volumen.

732. Spezifische Wärme der Gase. Während sich die spezifische Wärme bei konstantem Druck (wie früher gezeigt) leicht bestimmen läßt, trifft dies nicht zu für die spezifische Wärme bei konstantem Volumen. Auf Grund der dargelegten Folgerungen aus der mechanischen Wärmetheorie läßt sich aber sehr leicht das Verhältnis beider finden.

Eine besonders einfache Methode ist diejenige von Clément und Desormes mit Hilfe eines Glasballons von mindestens 25 Liter Inhalt mit messingener Fassung, großem Hahn, Manometer und Ansatzrohr zu einer kleinen Luftpumpe (Fig. 3141, S. 1199). Als Gefäß kann dabei ein leerer Schwefelsäureballon benutzt werden; als Luftpumpe eine Fahrradpumpe. Der Hahn kann durch einen Stöpsel ersetzt werden. Man pumpt soviel Luft hinein, daß das Wassermanometer einen

Druck von etwa 15 cm anzeigt. Öffnet man dann, nachdem die Temperatur Zimmertemperatur geworden, den Stöpsel bis der Druck sich ausgeglichen hat (adiabatische Zustandsänderung) und schließt ihn wieder, so wird das Manometer langsam steigen (um 4,2 cm), weil die durch Expansion abgekühlte Luft sich (bei konstantem Volumen) wieder auf Zimmertemperatur erwärmt. Umgekehrt kann man mit der Luftpumpe anfänglich den Druck auf 15 cm erniedrigen. Dividiert man mit der Differenz des anfänglichen und nachträglichen Manometerstandes in den ersteren, so erhält man mit ziemlicher Genauigkeit das gesuchte Verhältnis. Diese Differenz der Drucke bei derselben Temperatur des Gases ist $P_2 - P_1$ bei Fig. 3792, der anfängliche Überdruck $P_3 - P_1$. Somit ist

$$k = (P_3 - P_1) : (P_2 - P_1) = 15 : (15 - 4{,}2) = 1{,}4134.$$

Kurz (1884) vermeidet die Anwendung der Luftpumpe dadurch, daß er den Ballon mit offenem Hahn erst in ein kaltes Zimmer bringt, dann, nachdem der Hahn geschlossen, in ein geheiztes, und, nachdem er die Temperatur angenommen, den Hahn momentan öffnet und wieder schließt.

Looser (Z. 8, 296, 1895; 15, 260, 1902) verwendet zu dem Versuche das Doppelthermoskop (S. 1054).

Eine andere einfache Methode ist die Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Luftwellen mittels der Kundtschen Staubfiguren (Fig. 3737 und 3739, S. 1486). Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen bestimmt sich nämlich nach § 604 (S. 1365) durch die Formel $c = \sqrt{\frac{E}{d}}$, wobei E die Elastizität und d die Dichte bedeuten. Da nun bei dem raschen Verlauf der Druckänderungen ein Wärmeausgleich nicht möglich ist, darf für E nicht die isotherme Elastizität genommen werden, die gleich dem Drucke p des Gases ist (S. 990), sondern man muß die k mal so große adiabatische Elastizität einsetzen, d. h. es ist $c = \sqrt{\frac{k \cdot p}{d}}$. Für normale Luft ist $p = 10\,334$ kg pro Quadratmeter, $d = 1{,}29/9{,}81 = 0{,}132$ Hyl pro Cubikmeter, somit $c = \sqrt{\frac{1{,}4134 \cdot 10\,336}{0{,}132}} = 332$ m/sec bei 0° und 760 mm Barometerstand. Bei anderer Temperatur ist die entsprechende Dichte einzusetzen. Umgekehrt folgt aus der Formel

$$k = \frac{c^2}{p} \cdot d.$$

733. **Kinetische Energie der Gasmoleküle.** Nach § 731 ist die zur Erwärmung eines Gases verbrauchte Energie, falls keine äußere Arbeit geleistet wird, d. h. im Falle der Erwärmung bei konstantem Volumen, lediglich zur Vermehrung der Bewegungsenergie der Moleküle erforderlich, innere Arbeit wird nicht geleistet. Für 1 kg des Gases beträgt somit die gesamte Bewegungsenergie der Moleküle, wenn ϱ die Dichte,

$$E = 427 \,.\, c_v \,.\, \varrho \,.\, \tau \text{ Kilogrammeter.}$$

Von dieser Energie besteht ein Teil in der Energie der fortschreitenden Bewegung, K, ein anderer Teil in der Energie von Rotationen, Schwingungen und anderen inneren Bewegungen der Moleküle. Nun ist, wenn N die Zahl der Moleküle:

$$K = N \cdot \frac{mc^2}{2} = \frac{3}{2} p = \frac{3}{2} R \cdot \varrho \cdot \tau = \frac{3}{2} \cdot 427 (c_p - c_v) \varrho \tau,$$

also:

$$K : E = \frac{3}{2} \cdot (c_p - c_v) : c_v = \frac{3}{2} (k - 1).$$

Durch die Kundtsche Methode kann man k leicht für verschiedene Gase bestimmen und somit auch das Verhältnis $K : E$. Beispielsweise ist k für

Sauerstoff	Stickstoff	Wasserstoff	Chlor	Ammoniak	Kohlensäure
1,41	1,41	1,41	1,32	1,29	1,29

Für einatomige Gase muß $K = E$, also $k = 1{,}66$ sein. In der Tat ist mit obiger Methode gelungen, das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen für den einatomigen Quecksilberdampf zu finden und dadurch diese Folgerung der kinetischen Gastheorie zu bestätigen. Der Beweis, daß Quecksilberdampf ein einatomiges Gas ist, wird in einfacher Weise mittels des Avogadroschen Gesetzes geführt, welches sich, wie gezeigt, in einfacher Weise aus den Fundamentalgesetzen der kinetischen Gastheorie ableiten läßt. Bei einatomigen Gasen besteht also die gesamte Wärmebewegung in fortschreitender Bewegung der Moleküle, nicht teilweise in Rotationen oder Schwingungen derselben.

734. **Die Gleichung der Adiabaten** ergibt sich daraus, daß die bei einer kleinen Änderung zugeführte Wärme $c_v . d\tau + \frac{1}{427} p . dv = 0$ sein muß. Nach Division durch τ und Substitution von $pv = R\tau$, sowie $R = 427 (c_p - c_v)$ folgt:

$$c_v \cdot \frac{d\tau}{\tau} + (c_p - c_v) \frac{dv}{v} = 0$$

oder

$$\frac{d\tau}{\tau} + (k - 1) \frac{dv}{v} = 0 \qquad \log \tau + (k - 1) \log v = 1$$

$$\tau . v^{k-1} = Const \text{ oder } p . v^k = Const \text{ oder } \tau . p^{\frac{k-1}{k}} = Const.$$

735. **Ausströmungsgeschwindigkeit von Gasen.** Ist v die gesuchte Geschwindigkeit, so ist die Energie für 1 kg $= \frac{v^2}{2g}$ Kilogrammeter. Diese entsteht auf Kosten der Wärmemenge $427 c_p (\tau_0 - \tau)$, wenn τ_0 die anfängliche Temperatur des Gases, τ die infolge des Wärmeverbrauchs erniedrigte bedeuten. Somit ist

$$v = \sqrt{2g . 427 . c_p . (\tau_0 - \tau)}.$$

τ ergibt sich aus der Gleichung der Adiabaten.

736. **Versuche von Joule.** In größerem Maßstabe kann die Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents demonstriert werden, indem man ein cylindrisches, geschlossenes Kalorimeter, welches an die Achse einer mehrpferdigen Transmission angesetzt werden kann, mittels des Pronyschen Zaumes bremst und die entwickelte Wärmemenge bestimmt.

Ich verwende hierzu ein Kalorimeter aus starkem Zinkblech, dessen Anfangs- und Endtemperatur mit dem auch sonst benutzten Luftthermoskop bestimmt wird.

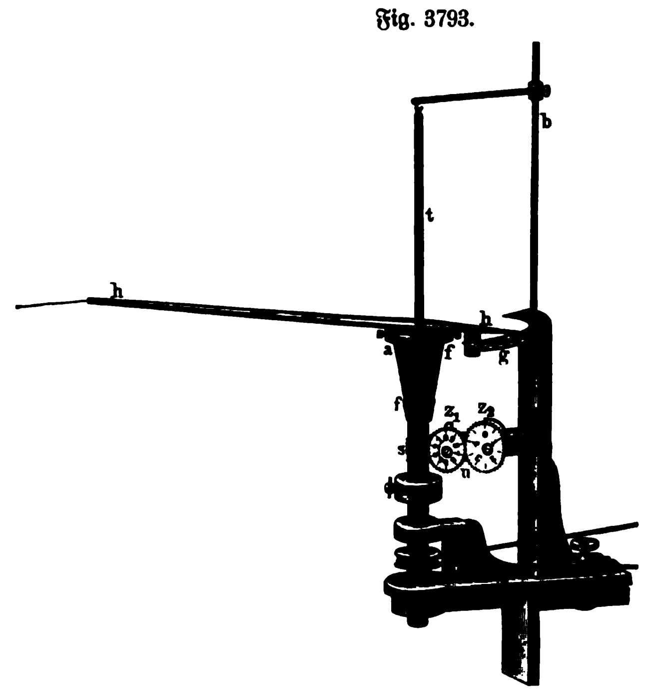
Beispielsweise war die Wassermenge 1 kg, der Wasserwert des Kalorimeters (Gewicht × spezifische Wärme) = 0,2 kg, die Temperaturerhöhung 13°, somit die

Wärmemenge 15,6 Kalorien. Der Pronyſche Zaum war belaſtet mit einem Gewicht von 2 kg am Hebelarm 0,66 m; die Zahl der Umdrehungen betrug 800, ſomit die Arbeit: $2\pi . 0,66 . 2 . 800 = 6630$ kgm. Hieraus folgt das mechaniſche Wärmeäquivalent $x = 6630/15,6 = 425$ Kilogramm pro Kalorie.

Man kann auch einen konſtanten Waſſerſtrom durch das Kalorimeter leiten und die Temperatur beim Ein- und Austritt beſtimmen. (Zu dieſer Modifikation des Verſuchs eignet ſich die Bremſe von Brauer, S. 1280, Fig. 3289.)

Zu Verſuchen in kleinerem Maßſtabe wird gewöhnlich der Apparat von Puluj (Fig. 3793 K, 105) gebraucht. Im weſentlichen beſteht derſelbe aus einem koniſch geformten, mit Queckſilber gefüllten kleinen Kalorimeter, welches in einen genau paſſenden, koniſchen, eiſernen Mantel eingeſetzt iſt und an einem ſeitlich angebrachten Stiel durch eine meßbare Kraft, geſpannte Schnur, Schraubendraht u. ſ. w. ſo gehalten wird, daß er ſich beim Umdrehen des Mantels trotz der ſtattfindenden Reibung nicht mit dreht und auch nicht durch die Kraft im entgegengeſetzten Sinne bewegt wird, d. h. alſo, daß die zurückhaltende Kraft und die Reibung gleich groß ſind. Zum Umdrehen des Mantels dient eine Schwungmaſchine, zum Meſſen der Temperaturerhöhung im Kalorimeter ein eingeſtecktes Thermometer. Bei Berechnung der Arbeit wird angenommen, daß der Mantel feſtſtehe und das Kalorimeter an ſeinem Stiel mit einer Kraft gedreht werde, welche gleich der Reibung iſt. Das Produkt dieſer Kraft mal dem Weg gibt die Arbeit.

Fig. 3793.



Man dreht ſo lange, bis die Temperatur um etwa 3 bis 5° geſtiegen iſt, hält an und verfolgt den Gang des Thermometers, um die beobachtete höchſte Temperatur für Strahlung und Leitung korrigieren zu können.

Wenn Pulujs Apparat (geliefert von Eiß in Wien) längere Zeit benutzt wurde, ſo wird nach Dorn (1885) die Reibung zwiſchen den Kegeln zu groß und zu unregelmäßig. Man beugt dem dadurch vor, daß man zwiſchen die Kegel etwas Vaſelin bringt. Das Thermometer erhält zweckmäßig durchſichtige Skala und wird im halbdunkeln Zimmer ſtark vergrößert auf einen Schirm projiziert, natürlich mit der Vorſicht, daß die Kegel vor der Strahlung der elektriſchen Lampe geſchützt ſind. Zur Vermeidung von Korrektionen ſorgt man dafür, daß die Anfangstemperatur etwa ebenſoviel unter Zimmertemperatur liegt, wie die Endtemperatur darüber.

Eine Modifikation des Apparates nach Slotte (Z. 15, 12, 1902) zeigt die Fig. 3794 (Lb, 130)[1]).

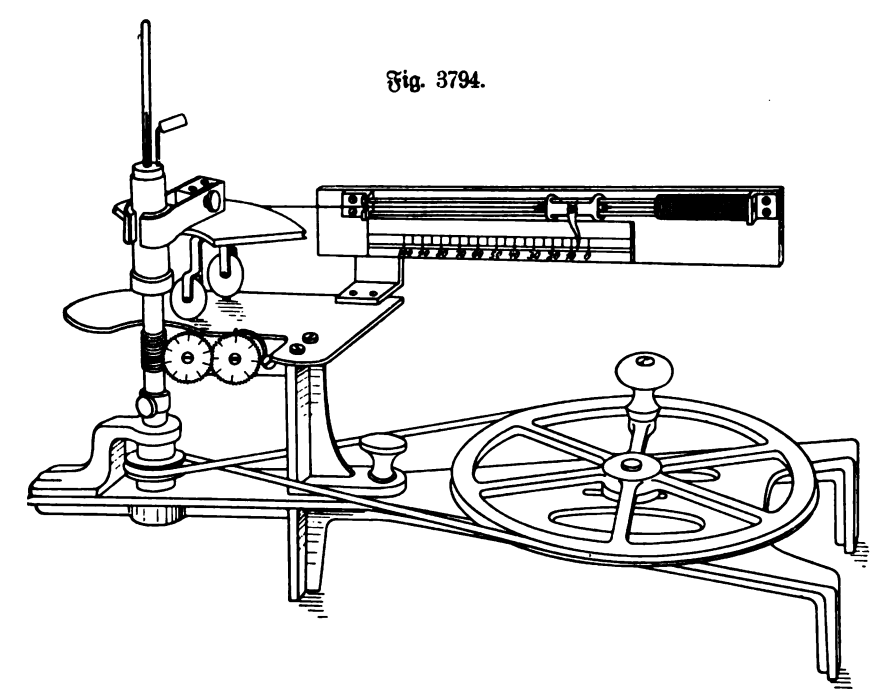


Fig. 3794.

Grimsehl (Z. 16, 290, 1903) gibt dem Apparat die Form Fig. 3795. Als Kalorimeter dient dabei ein aus dünnem Kupferblech gearbeiteter dünner Hohlkonus, welcher mit einem Alkoholmanometer in Verbindung steht, so daß er gleichzeitig als Luftthermometer gilt.

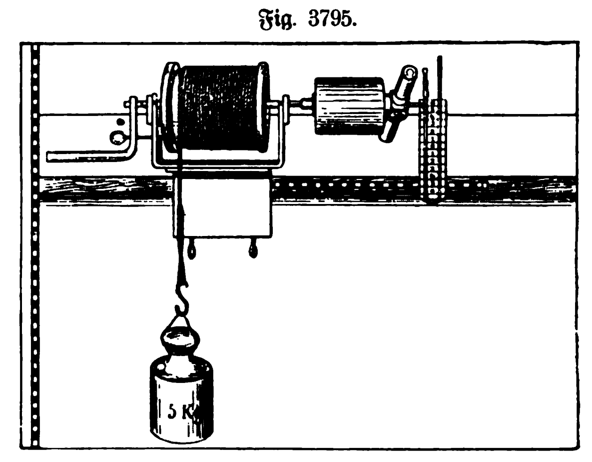


Fig. 3795.

Bei einem von vielen Versuchen ergab sich beim Fallen des 5 kg-Gewichtstückes aus 70 cm Höhe die mechanische Energie zu 3,5 mkg. Die Steighöhe des Manometers betrug hierbei 38 mm, das bedeutet eine Temperaturerhöhung um 38 . 0,05 = 1,9° C. Da der Wasserwert des Kupferkonus 4,08 g betrug, ergibt sich die entwickelte Wärmemenge zu 4,08 . 1,9 = 7,75 Grammkalorien = 0,007 75 Kilogrammkalorien. Hieraus folgt für das mechanische Wärmeäquivalent der Wert:

$$\frac{3,5}{0,00775} = 451, \quad \text{also } 1 \text{ Kal.} = 451 \text{ mkg.}$$

[1]) Über einen Apparat zur genaueren Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents mit Elektromotorbetrieb siehe Hespe, Z. 17, 334, 1904.

737. **Versuche von Joule und Thomson.** Strömt komprimierte Luft aus einem Druckluftkessel aus, so geht ein Teil der in ihr enthaltenen unsichtbaren Bewegungsenergie (Wärme) in sichtbare Bewegungsenergie über[1]), welche nicht auf das Thermometer einwirkt, so daß, da der bleibende Rest kleiner ist als die ursprünglich vorhandene Energiemenge, ein eingesetztes Thermometer sinken muß. Beispielsweise würde die adiabatische Ausdehnung von Luft bei 0° von 100 auf 1 Atm. eine Endtemperatur von — 200° ergeben. Diese Methode ist namentlich von Cailletet bei seinen bekannten Versuchen über Verflüssigung permanenter Gase (Nebelbildung) benutzt worden. (S. a. S. 1021, 1107, 1190.)

Läßt man einen Druckluftmotor eine Last in die Höhe ziehen, so gibt die in der gehobenen Last aufgespeicherte potentielle Energie das Äquivalent der in dem Motor verschwundenen Wärmemenge, so daß sich hieraus die Abkühlung der Luft beim Durchgang durch den Motor berechnen ließe. Ebenso würde eine Druckluftturbine, deren Arbeitsleistung etwa durch Bremsen mit einem Pronyschen Zaum (S. 766) in Wärme umgesetzt würde, sich dazu eignen, die Luft stark abzukühlen, da eine der in der Bremse frei werdenden gleiche Wärmemenge in der Turbine verschwinden muß.

Würde man nun aber die austretende kalte Luft durch die Bremse hindurch leiten, so daß sie die hier freigewordene Wärme aufnimmt, so müßte anscheinend die anfängliche Temperatur genau wieder hergestellt werden, da Wärmeverlust und Wärmegewinn sich vollkommen decken. Tatsächlich ist dies aber nur der Fall bei vollkommenen Gasen, zu welchen namentlich Wasserstoff bei bestimmter Temperatur zu rechnen ist. Bei Luft ergibt sich ein Überschuß von Abkühlung, bei Wasserstoff und Helium verhält sich die Sache umgekehrt, die Wärme ist mehr als ausreichend, die Abkühlung zu kompensieren, das Gas würde somit den Apparat nicht im abgekühlten Zustande, sondern erwärmt verlassen.

Die beschriebene Versuchsanordnung würde zum Nachweis solcher kleiner Temperaturänderungen der Wärmeverluste wegen nicht geeignet sein. Man kann indes, wie Joule und Thomson gezeigt haben, den Motor und die Bremse ganz entbehren, indem man das Gas z. B. durch einen Wattepfropf hindurch strömen läßt. Die Watte wirkt hier als Bremse und vernichtet die Bewegungsenergie, welche das Gas (auf Kosten von Wärme) annehmen würde, wenn es durch Öffnungen ohne Reibung in einen leeren Raum ausströmen könnte.

An Stelle des Wattepfropfs kann auch einfach ein Hahn oder Ventil treten. Hierbei wird zwar die Bewegungsenergie im Hahn selbst noch nicht ganz zerstört, wohl aber bei der Reibung in der Rohrleitung, welche sich an den Hahn anschließt.

Leitet man also die ausströmende Luft durch enge Röhren hindurch, oder durch einen porösen Körper, wie etwa einen Baumwollepfropf, so daß ihre Bewegungsenergie wieder in unsichtbare Energie (Wärme) übergeführt wird, so müßte sich eigentlich die anfängliche Temperatur wieder herstellen; die Expansion der Luft könnte nicht von der Temperaturänderung des Gases begleitet sein, ebenso wie bei der Expansion in einem evakuierten Kessel (S. 1200) die Gesamtwärme vor und nach dem Versuch dieselbe ist. Wie bemerkt, ist dies aber nur bei einzelnen Gasen und zwar nur bei bestimmtem Zustande derselben, in welchem sie als vollkommene

[1]) Es bleibt natürlich zunächst, wie die Reaktionserscheinungen beweisen, ebensoviel entgegengesetzte Bewegungsenergie übrig, welche dem Gefäß bezw. der Erde, mit welcher dieses verbunden ist, durch elastischen Stoß eine minimale Beschleunigung erteilt.

Gase bezeichnet werden, der Fall. Gewöhnliche Luft dagegen zeigt z. B. bei solcher sogenannten „freien Expansion“ von 100 auf 1 Atm. eine Abkühlung von 27,6° und wird deshalb als unvollkommenes Gas bezeichnet[1]).

Wenn die Druckänderung dp Atm. beträgt, ist die Temperaturerniedrigung dt

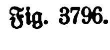
$$dt = 0{,}276 \, . \, dp \left(\frac{273}{273 + t}\right)^2 \text{ Grad Celsius.}$$

Bei Wasserstoff und Helium kann bei „freier Expansion“, vermutlich infolge innerer molekularer Arbeit, eine Temperaturerhöhung eintreten, anstatt wie bei anderen Gasen ein Temperaturerniedrigung. Sie werden in diesem Zustande als übervollkommene Gase bezeichnet.

Unter 200° erhält man indes stets Temperaturerniedrigung, d. h. bei solcher Kälte verhalten sich alle Gase als unvollkommen. Eventuell ließe sich dies mit Lindes Luftverflüssigungsmaschine nachweisen.

738. **Verflüssigung von Luft.** Bei den älteren Versuchen von Wroblewski, Cailletet u. s. w. wurde die Abkühlung der komprimierten Luft durch Druckverminderung unter solchen Umständen hervorgebracht, daß die dabei geleistete Arbeit nicht wieder Wärme erzeugen konnte, welche die durch die Entspannung bewirkte Temperaturänderung kompensierte (Kaltluftmaschinen). Die Abkühlung erfolgt dabei zunächst in dem Gefäß, aus welchem die Luft ausströmt, sodann kühlt sich die Luft weiter ab in der Ausströmungsöffnung, indem sich dort Wärme in Bewegungsenergie umsetzt, welche also bei diesen älteren Verfahren nicht beeinträchtigt werden darf.

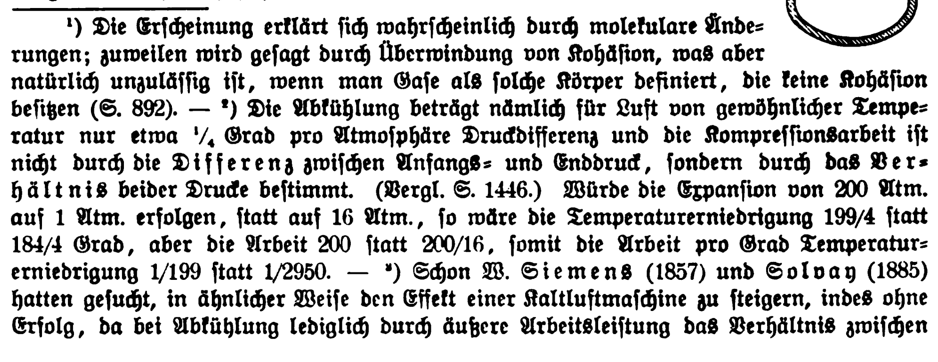
Auf solchem Wege war es nicht möglich, erhebliche Mengen von flüssiger Luft zu erzeugen. Erst durch Verzicht auf die solcher Art durch Leistung äußerer Arbeit entstandene Abkühlung und alleinige Benutzung der nach Joule und Thomson durch innere Arbeitsleistung bedingten Temperaturerniedrigung gelang es ohne große Kosten, die Luft in großen Mengen zu verflüssigen.


Fig. 3796.

Die erste praktisch brauchbare Luftverflüssigungsmaschine wurde am 20. Mai 1895 von Linde in München öffentlich demonstriert und gezeigt, daß damit stündlich mehrere Liter flüssige Luft produziert werden können. Ein Jahr später wurde ein ähnlicher Apparat von Hampson ausgeführt.

Bei Lindes Maschine erfolgt die Expansion von einem Anfangsdruck von 200 Atm. auf einen Enddruck von 16 Atm., welches Verhältnis sich als das günstigste erwiesen hat[2]).

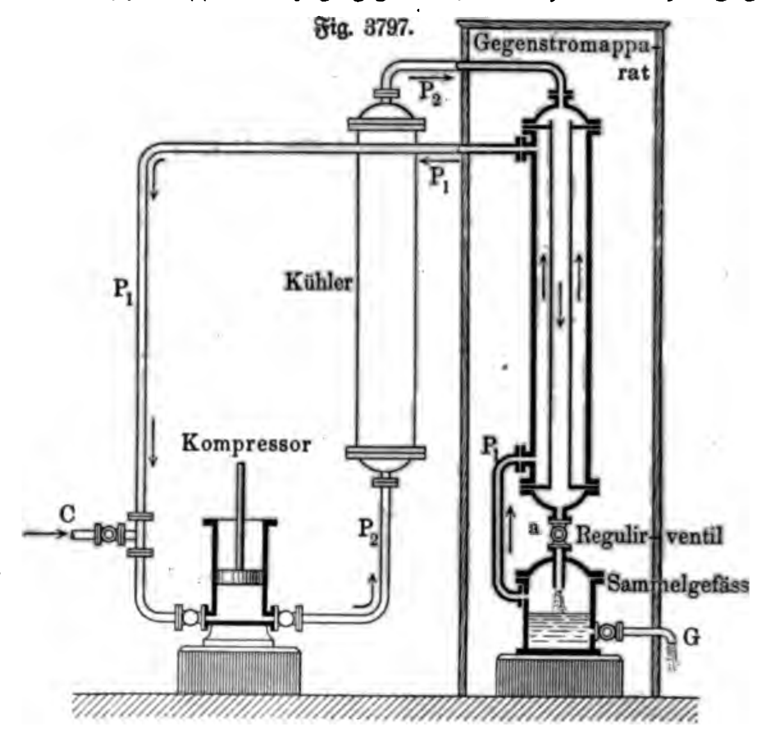
Die geringe Abkühlung steigert Linde nach dem sogenannten Gegenstromprinzip[3]), indem er die abgekühlte Luft durch eine


[1]) Die Erscheinung erklärt sich wahrscheinlich durch molekulare Änderungen; zuweilen wird gesagt durch Überwindung von Kohäsion, was aber natürlich unzulässig ist, wenn man Gase als solche Körper definiert, die keine Kohäsion besitzen (S. 892). — [2]) Die Abkühlung beträgt nämlich für Luft von gewöhnlicher Temperatur nur etwa $^1/_4$ Grad pro Atmosphäre Druckdifferenz und die Kompressionsarbeit ist nicht durch die Differenz zwischen Anfangs- und Enddruck, sondern durch das Verhältnis beider Drucke bestimmt. (Vergl. S. 1446.) Würde die Expansion von 200 Atm. auf 1 Atm. erfolgen, statt auf 16 Atm., so wäre die Temperaturerniedrigung 199/4 statt 184/4 Grad, aber die Arbeit 200 statt 200/16, somit die Arbeit pro Grad Temperaturerniedrigung 1/199 statt 1/2950. — [3]) Schon W. Siemens (1857) und Solvay (1885) hatten gesucht, in ähnlicher Weise den Effekt einer Kaltluftmaschine zu steigern, indes ohne Erfolg, da bei Abkühlung lediglich durch äußere Arbeitsleistung das Verhältnis zwischen

ie erste umgebende Rohrleitung zurückströmen läßt, welche durch eine geeignete Wärmeschutzmasse gegen den Zutritt der Wärme der umgebenden Luft geschützt ist (Fig. 3796) [1]. Hierdurch wird die Temperatur der neu ankommenden Luft niedriger ls die der zuerst angekommenen, somit auch die der entspannten Luft, diese wirkt lso nunmehr noch stärker abkühlend als die ankommende und so muß ganz von selbst ie Temperatur immer mehr sinken, bis schließlich Verflüssigung der Luft eintritt [2].

Bei einem kleinen zur Verflüssigung von Sauerstoff dienenden Apparat nach)ewar wird der Sauerstoff nicht durch Pumpen verdichtet, sondern direkt aus den käuflichen stählernen Sauerstoffflaschen in den Gegenstromapparat geleitet. Die Anordnung des Lindeschen Apparates zeigt Fig. 3797, die nähere Einrichtung Fig. 3798.

Fig. 3797.



Der Gegenstromapparat besteht aus drei ineinander gesteckten Spiralröhren ıs Kupfer. Das Ventil *a* dient zur Entspannung des auf 200 Atm. komprimierten, ı innersten Rohre enthaltenen Gases, welches dann durch die zweite Röhre zurückrömt. Durch das Ventil *b* kann ein regulierbares Luftquantum durch die dritte

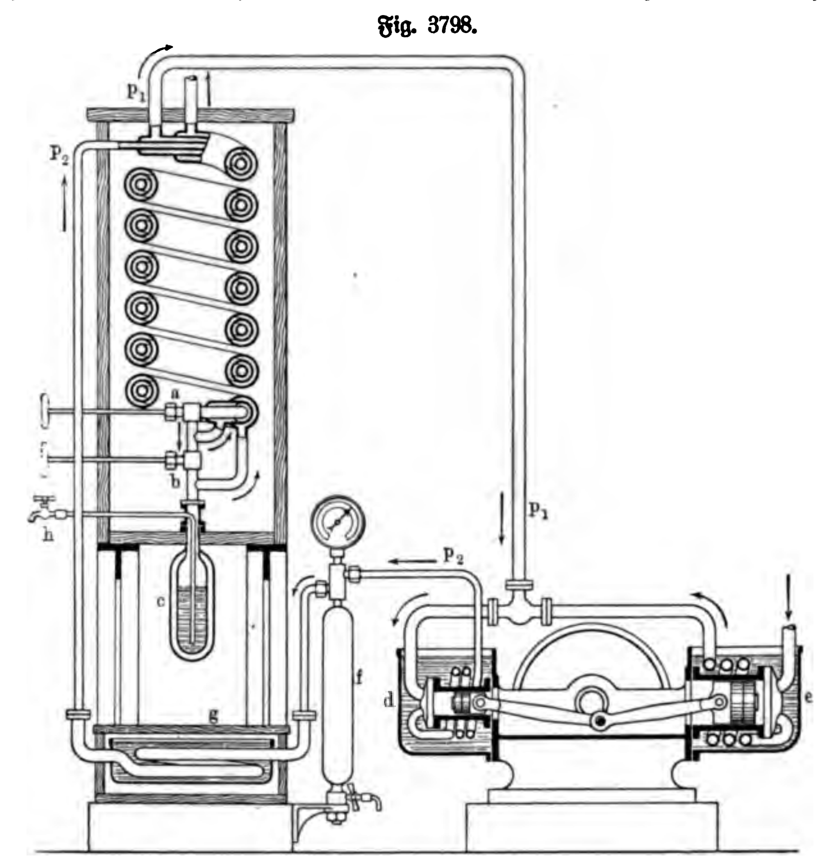
---

nfangs- und Endtemperatur nach dem Gesetz der adiabatischen Temperaturänderung stets ıs gleiche bleibt, die Differenz also immer geringer wird. Die Besprechung des Prinzips : von um so größerem Wert, als ein analoges Verfahren, das sogenannte Dynamoprinzip, e hohe Leistungsfähigkeit der Influenz- und Dynamomaschinen bedingt.

[1]) Die kritische Temperatur der Luft liegt bei — 140° C., der kritische Druck beträgt Atm. Soll also die Luft unter Atmosphärendruck verflüssigt werden, so muß sie auf 191° abgekühlt werden. — [2]) Lindes Apparat ist zu beziehen von der Gesellschaft für :ndes Eismaschinen in München und zwar für einen Effekt von 3 bis 190 Pferdekräften, obei die Leistung ³/₄ bis 100 Liter flüssiger Luft pro Stunde beträgt. Zur Temperaturessung dient ein Eisenkonstantenthermoelement in Verbindung mit Galvanometer mit rekter Temperaturablesung, zu beziehen von Keyser u. Schmidt in Berlin. Maschinen n 3,5 bis 12 Pferdekräften kosten 4000 bis 8000 Mk.

Röhre in die freie Luft entlassen werden. Ein dieser entweichenden Luftmenge, sowie der zur Flüssigkeit verdichteten Luft entsprechendes Luftquantum wird von dem Kompressor aus der Atmosphäre angesaugt. Die Spiralröhren sind durch rohe Schafwolle, welche in den umgebenden Holzmantel fest eingepreßt wird, gegen Zutritt der äußeren Wärme geschützt. Der Kompressor besitzt zwei Cylinder, von welchen der Niederdruckcylinder den Druck auf 20 Atm. bringt und der Hochdruck-

Fig. 3798.



cylinder ihn weiter auf 200 Atm. erhöht. Zur Kühlung des Niederdruckcylinders dient einfach Wasser. Die aus dem Hochdruckcylinder kommende komprimierte Luft wird in einem mit Salz und Eis gefüllten Verkühler auf —15° abgekühlt, ehe sie in den Gegenstromapparat eintritt, auch muß sie einen Trockenapparat passieren, um Verstopfung der Spirale durch Eisbildung zu verhindern.

Beim Gebrauch des Apparates ist namentlich darauf zu sehen, daß das Nadelventil gut arbeitet, da sonst leicht Verstopfung eintritt. Der Kompressor muß nach jedem Gebrauch sofort auseinandergenommen und gereinigt werden. Der Gegenstromapparat, insbesondere die Kühlschlange, muß kräftig bis zur Trocknung ausgeblasen werden.

Zur Aufbewahrung der flüssigen Luft dienen doppelwandige Gefäße nach Dewar, Fig. 3799, 3800 (Lb, 2,50 bis 7,50, mit Untersatz, wie in Fig. 3801, 3802 um 1,70 mehr)[1]), zweckmäßig mit innerer Versilberung zur Abhaltung von

[1]) Auch zu beziehen von E. Gundelach, Gehlberg; Burger, Berlin N., Chausseestraße 2E; Franz Müller, Bonn (12 bis 60 Mk.); Müller-Uri, Braunschweig (5 bis

Fig. 3799.

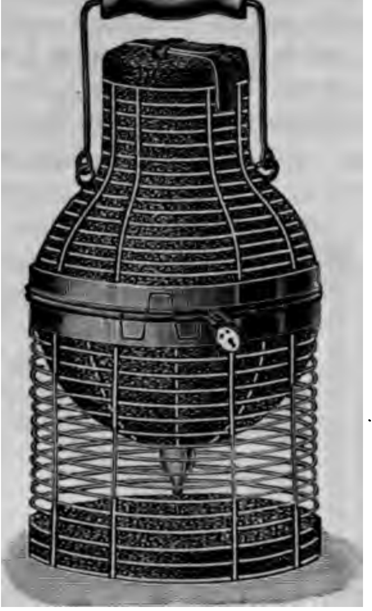
Fig. 3800.



Fig. 3801.



Fig. 3803.



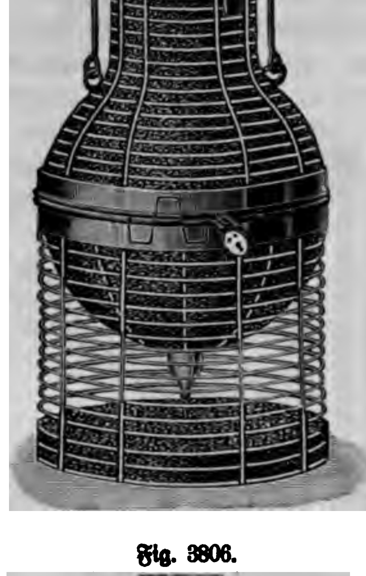


Fig. 3804.

Fig. 3802.

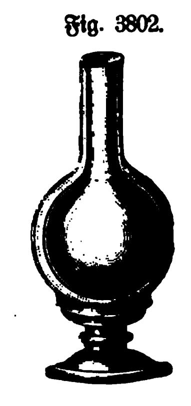


Fig. 3805.



Fig. 3806.

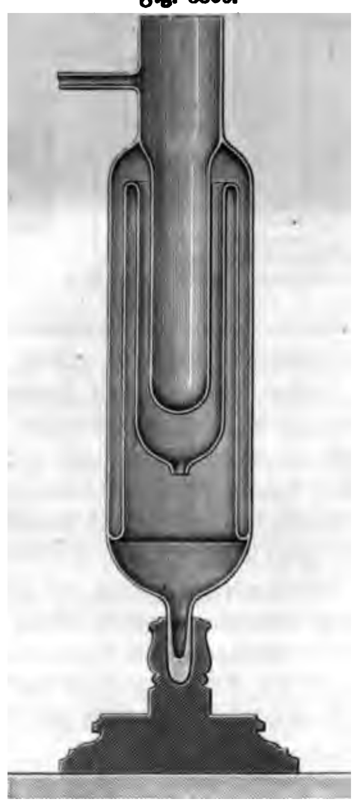
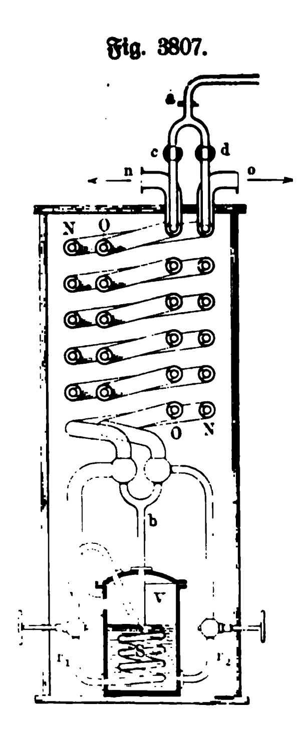


Fig. 3807.



Wärmestrahlen (eventuell mit besonderem durchsichtigen unversilberten Streifen wie in Fig. 3805 Lb, 3 bis 9). Die Wirksamkeit solcher Gefäße ergibt sich aus der kinetischen Gastheorie, insofern, wenn die Wärme ein Bewegungszustand der Moleküle ist, solche naturgemäß nicht durch den Raum zwischen den beiden Wänden hindurchdringen kann, aus welchem die Luft möglichst vollkommen ausgepumpt wurde.

In solchen lose bedeckten Flaschen hält sich die flüssige Luft so lange, daß man sie als Eilgutsendung selbst auf größere Entfernungen versenden kann[1]. 2 Liter flüssige Luft sind selbst nach acht Tagen noch nicht völlig verdunstet. Zum Gebrauch wird die Flasche in einen Drahtkorb wie Fig. 3803 eingesetzt. Um eine Quantität der Flüssigkeit herauszuheben, setzt man einen doppelt durchbohrten Kautschukstopfen mit Glasröhren, wie bei einer Spritzflasche, auf, mit der Vorsicht, daß die lange Röhre den Boden der Flasche nicht erreichen kann, was natürlich Zertrümmerung derselben infolge des hohen darauf lastenden Luftdruckes zur Folge hätte. Bei der Flaschenform, Fig. 3805, ermöglicht ein von Versilberung freier Streifen zu erkennen, wie hoch die Flüssigkeit steht. Bei Weinholds doppelten Flaschen ist die Versilberung weggelassen (Fig. 3806), um den Gefäßinhalt direkt sehen zu können. Durch die doppelte Vakuumschicht wird dennoch ein allerdings bedeutend geringerer Wärmeschutz bedingt[2].

Eine besonders interessante Anwendung des Lindeschen Apparates ist die Sauerstoffdarstellung. Da nämlich bei Atmosphärendruck der Sauerstoff bei — 182°, der Stickstoff bei — 194° siedet, so entweicht aus verdunstender flüssiger Luft zunächst vorzugsweise der Stickstoff. Der Rest muß also an Sauerstoff reicher werden. Man läßt denselben dann wieder in Gas übergehen und verwendet die entstehende Verdunstungskälte zur Verflüssigung neuer Luftmengen.

Die Ausführung des Apparates zeigt Fig. 3807. Die Spirale S, welche die neu verdichtete Luft zuführt, dient als Heizschlange für die angesammelte flüssige Luft. Der abdestillierende Stickstoff entweicht durch n, den flüssigen Sauerstoff läßt man durch r_2 und o austreten. Pro Pferdekraft und Stunde kann man mehr als 5 cbm Luft vom Normalzustand in Sauerstoff und Stickstoff scheiden.

Zur Erzielung sehr niedriger Temperaturen dient besonders flüssiger Sauerstoff, welcher, wenn er bei 7,5 mm Druck verdampft, eine Temperatur von 211° erzeugt[3].

Zu den Experimenten, welche mit flüssiger Luft ausgeführt werden können, gehört ferner die Erhöhung der Festigkeit und Sprödigkeit von Eisen, die Explosion eines mit sauerstoffreicher flüssiger Luft gefüllten Schwammes beim Anzünden, das Sprödewerden von Kautschuk, welcher unter dem Hammer zersplittert wie Glas, ebenso das Gefrieren und Sprödewerden einer eingetauchten Blume, die Elastizität

---

11 Mk.) u. a., Transportkörbe aus Drahtgeflecht nach Fig. 3803 liefert Burger für Gefäße für 3 Liter Inhalt zu 18 Mk.; Thermometer mit Pentanfüllung (Fig. 3804), welche bis 200° reichen, zu 25 Mk. Die Gesellschaft für Lindes Eismaschinen, München, Nymphenburgerstr. 76, liefert Flaschen zu 5,5 bis 13 Mk. von 250 bis 750 ccm Inhalt.

[1] Fertig ist flüssige Luft zu beziehen von den Markt- und Kühlhallen, Berlin, Trebbinerstr. 5, und von der Gesellschaft für Lindes Eismaschinen, München, Nymphenburgerstr. 76 (ev. telephonisch). — [2] Siehe auch Heumann-Kühling, Anleitung zum Experimentieren, Braunschweig 1904, S. 76 und 237, und Weinhold, Physikalische Demonstrationen, 4 Aufl. 1905. — [3] Für weniger tiefe Temperaturen eignet sich namentlich flüssiges Äthylen, dessen Siedepunkt bei Atmosphärendruck — 103° und bei 9,8 mm Druck — 150° beträgt.

einer Spiralfeder aus Bleidraht oder Lotmetall, das Eintreiben eines Nagels mit einem Hammer aus gefrorenem Quecksilber, die Bildung von Kohlensäureschnee beim Brennen einer Kohle in flüssiger Luft, das Abkühlen der flüssigen Luft in einem porösen Tongefäß von — 191° auf — 220°.

Alkohol wird zähflüssig und erstarrt allmählich amorph, Schwefeläther kristallisiert plötzlich[1]). Baumwolle, mit etwas flüssiger Luft getränkt, verbrennt wie Schießbaumwolle, Kohlepulver, in Fließpapier gewickelt und mit flüssiger Luft getränkt, verbrennt sehr heftig und explodiert, mit einem Knallzünder gezündet, wie Dynamit.

Versuche nach Tripler: Ein mit flüssiger Luft teilweise gefüllter Teekessel, auf Kohlenfeuer erhitzt, beschlägt sich am Boden mit fester Kohlensäure, während Dampfwolken entweichen. Hineingeschüttetes Wasser gefriert sofort. Wird er auf einen Block Eis gestellt, so setzt sich das Sieden der Luft ruhig weiter fort.

Über Herstellung hoher Vakua durch flüssigen Wasserstoff siehe Z. 12, S. 232, 1899, über Destillation bei niedrigen Temperaturen Z. 9, 12, 1898[2]).

Zum Abfüllen der flüssigen Luft dient ein kleines Kautschukgebläse. Man taucht die Abfüllvorrichtung langsam ein, damit die flüssige Luft nicht in heftiges Kochen kommt. Der Stöpsel wird zeitweise gelüftet und mit Fließpapier trocken gehalten, ebenso das Ausflußrohr, damit sich der flüssigen Luft kein Wasser beimischt. Beim Einfüllen in ein doppelwandiges Gefäß muß die flüssige Luft langsam aufsteigen, damit die Schweißstelle des Gefäßes nicht zu plötzlich gekühlt wird.

Die Einrichtung des Hampsonschen Apparates[3]) zeigen die Fig. 3808 a, b und 3809. Der „Auswechsler", der Behälter, in welchem das ausgedehnte Gas Wärme aus dem komprimierten aufnimmt, hat die Form eines Cylinders von 43 cm Höhe und 20,5 cm Durchmesser, welcher auf starkem Stativ montiert ist. Er bietet deshalb dem Eindringen von Wärme möglichst geringe Oberfläche dar. Die denselben erfüllenden Spiralröhren, durch welche das Gas abgekühlt werden soll, haben möglichst geringe Eigenwärme und möglichst große Leitungsfähigkeit. Mit einem Kompressor, der im stande ist Luft von 100 bis 200 Atm. Druck zu liefern, kann der Apparat tagelang andauernd gebraucht werden und erzeugt dann pro Stunde 1 Liter Luft in Form einer klaren Flüssigkeit, die nicht filtriert zu werden braucht, da die Kohlensäure durch ein vorgeschaltetes Gefäß mit Ätzkalistücken entfernt wird. Der Arbeitende hat nur das Manometer zu überwachen und das Ausströmungsventil zu kontrollieren. Eis, Salz, Kohlensäure oder andere Kühlmittel sind nicht erforderlich. Man kann auch ohne Kompressor und nur in Verbindung mit einem mit komprimierter Luft oder Sauerstoff gefüllten Cylinder flüssige Luft erzeugen. In diesem Falle müssen die Spiralröhren länger abgekühlt werden, indem man kalten Dampf aus einem mit flüssiger Kohlensäure gefüllten Cylinder über dieselben leitet.

[1]) Weinhold, Physik. Demonstrationen, 4. Aufl., 1905, S. 661. — [2]) O. Müller (Beibl. 24, 672, 1900) macht auf verschiedene Mängel des Lindeschen Gegenstromapparates aufmerksam. Auch Olszewski (Ann. d. Physik 10, 769; 12, 196, 1903; Z. 16, 353, 1903) empfiehlt für Demonstration besonders den Apparat von Hampson, da er sich nicht nur durch einfacheren Bau, sondern auch durch schnelleres und sicheres Funktionieren auszeichnet. Während bei dem Hampsonschen Apparat die Verflüssigung schon nach zehn Minuten nach Beginn der Expansion anfängt, beginnt sie beim Lindeschen Apparat erst nach zwei bis drei Stunden. — [3]) Dr. Hampsons Laboratoriumsapparat zur Verflüssigung von Wasserstoff und Sauerstoff ist zu beziehen von C. Gerhardt, Bonn a. Rh., Marquarts Lager chemischer Utensilien, zum Preise von 1360 Mk. ohne Motor und Kompressor. Letzterer wird auf Verlangen ebenfalls geliefert.



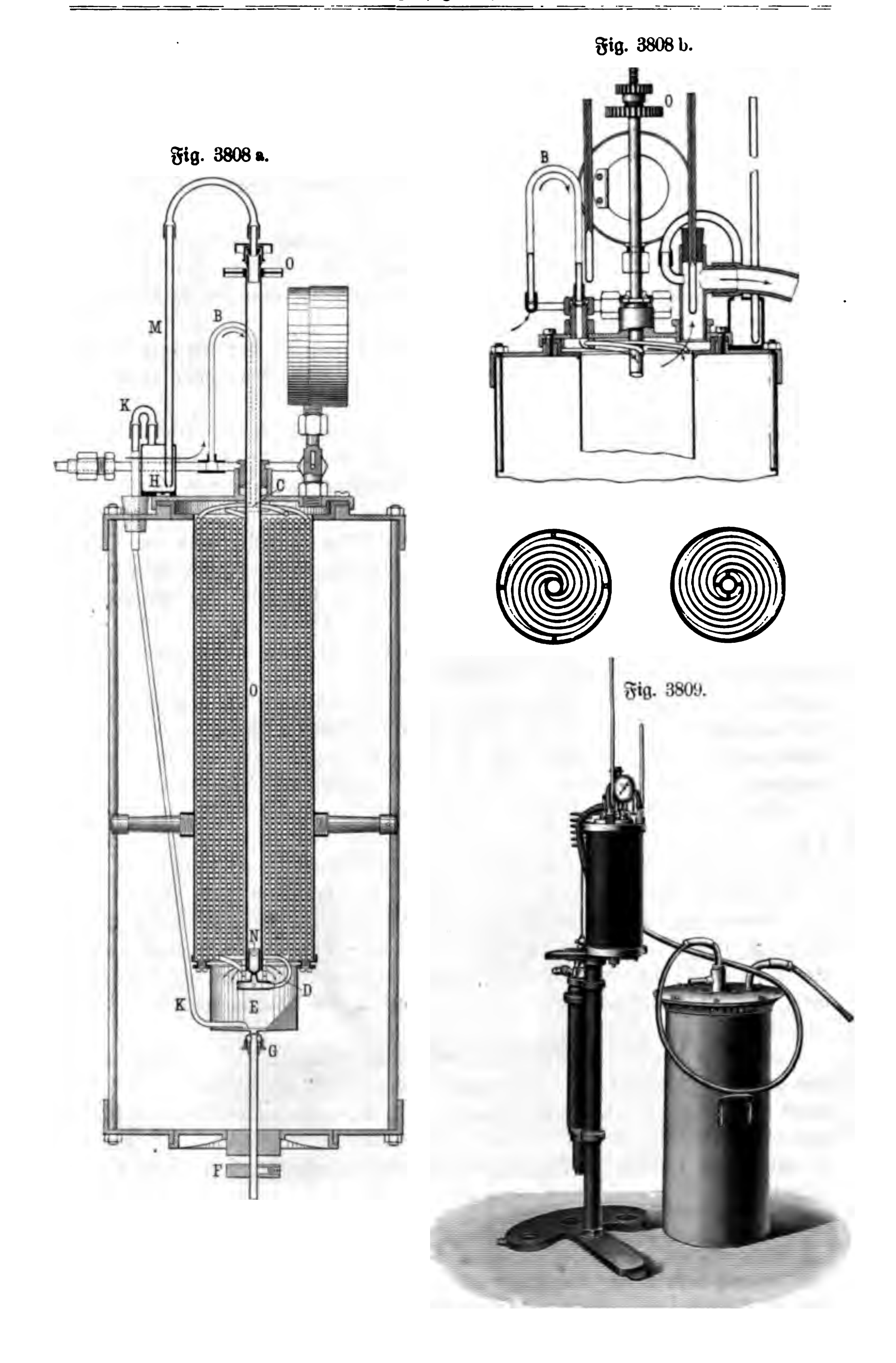


Fig. 3808 a.

Fig. 3808 b.

Fig. 3809.

Ein Apparat speziell zur Verflüssigung des Wasserstoffs wurde von Travers (Zeitschr. f. phys. Chem. 37, 100, 1901) konstruiert. Derselbe ist im wesentlichen eine Verbindung der Lindeschen Maschine mit einem Hampson-Verflüssiger. Bezüglich der Einzelheiten sei auf die zitierte Abhandlung verwiesen. Der Wasserstoff muß dabei mit flüssiger Luft vorgekühlt werden, da er erst bei sehr niederer Temperatur (unter — 80,5°) die Eigenschaft erhält, sich bei „freier Expansion" abzukühlen[1]).

Verdunstender flüssiger Wasserstoff hat eine Temperatur von — 252,5°. Fluorgas verflüssigt sich bei — 187° und erstarrt bei — 233°. Flüssiges Ozon, eine tiefblaue Flüssigkeit, ist explosibel. (Über Vorsichtsmaßregeln bei Demonstration siehe Weinhold a. a. O.)

Über das indifferente chemische Verhalten der Körper bei sehr niedrigen Temperaturen siehe Z. 9, 14, 1896. Flüssiges Fluor z. B. greift Glasgefäße nicht an[2]).

739. **Arbeit durch Dampf.** Sehr beträchtlich ist die innere Arbeit bei der Dampfbildung. Wird z. B. 1 Liter Wasser bei 760 mm Druck, also bei 100°, verdampft in einem Cylinder von 1 qdm Querschnitt, so entwickeln sich daraus 1650 Liter Wasserdampf, d. h. die etwa durch einen leicht beweglichen Kolben davon getrennte Atmosphäre, welche eine Last von 103,36 kg darstellt, wird um 165 m nach oben verschoben, somit eine Arbeit von 103,36 × 165 = 17000 Kilogrammmeter geleistet. Dieselbe ist äquivalent 17000/427 = 40,2 Kal. Die gesamte, zur Verdampfung des Wassers nötige Wärme beträgt 536,5 — 40,2 = 496,3 Kal. Diese sogenannte innere latente Wärme, die Differenz der Verdampfungswärme und der äußeren latenten Wärme, ist somit zur Leistung der inneren Arbeit, d. h. zur Umwandlung der Wasser- in Dampfmoleküle verbraucht worden. Um das Wasser auf 100° zu erhitzen, waren 100,5 Kal. nötig. Das Verhältnis 40,2/637 = 0,063, d. h. äußere latente Wärme : Gesamtwärme, gibt den Wirkungsgrad dieser einfachen Dampfmaschine, d. h. das Verhältnis der in Arbeit umgesetzten zur verbrauchten Energie.

Wird der Kolben belastet, etwa derart, daß der wahre Druck des Dampfes 4 Atm. oder der Überdruck 3 Atm. wird, so wäre das Volumen des Dampfes 448 Liter, die gehobene Last 4 . 103,36 kg, die Hubhöhe 44,8 m, somit die Arbeit 18300 Kilogrammeter und die äußere latente Wärme 18300/427 = 43,6 Kal. Die Verdampfungswärme beträgt bei diesem Druck 505,1 Kal., somit die innere latente Wärme 505,1 — 43,6 = 461,5 Kal. Zur Erhitzung des Wassers von 0° bis zu der dem Druck von 4 Atm. entsprechenden Temperatur 144° sind 145,3 Kal. nötig, somit ist die Gesamtwärme 650,4 Kal. und der Wirkungsgrad 43,6/650,4 = 0,067.

Läßt man den Dampf, wie es bei einer Auspuffdampfmaschine geschieht, nachdem er die Last gehoben hat, in die äußere Atmosphäre entweichen, so daß sein Druck auf 1 Atm. zurückgeht, so leistet er abermals durch Überwindung des Atmosphärendrucks Arbeit, aber keine nutzbare. Die Wärme, die er dann noch enthält, ist kleiner als die aufgewandte um das Äquivalent der Arbeitsleistungen. Man kann ihm nur noch 596,8 statt 650,4 Kal. entziehen.

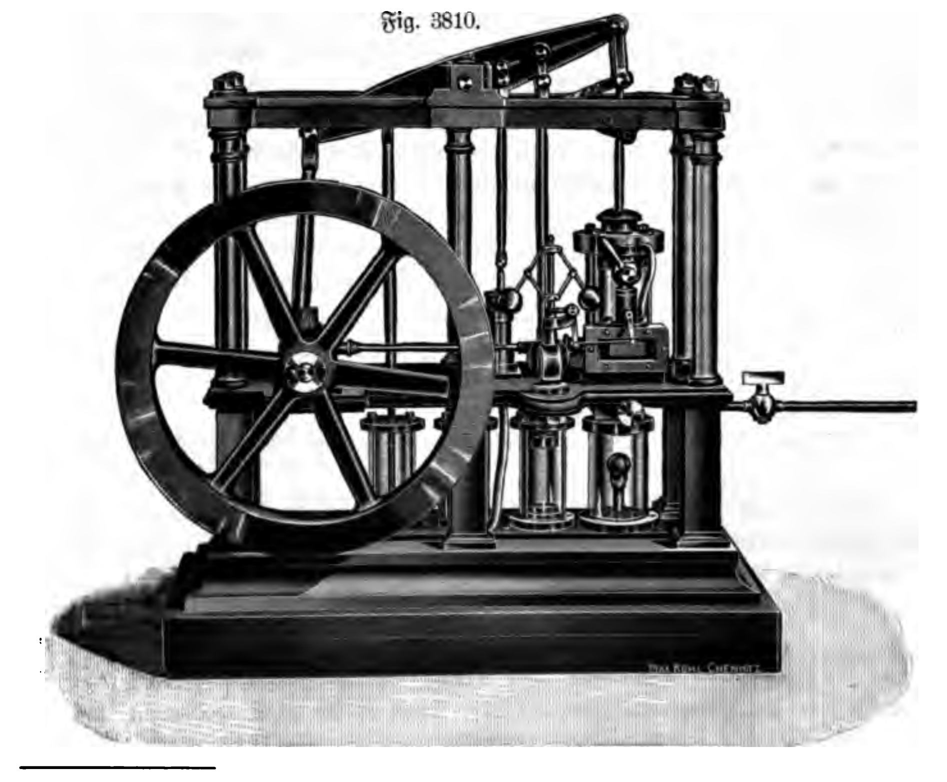
[1]) Über neuere Formen des Apparates siehe Travers, Experimental-Untersuchungen von Gasen, Fig. 108 bis 110. Siehe auch A. Hehl, Flüssige Luft, Halle 1901, Schwetschke. Über flüssiges Helium siehe Nat. Rundschau 18, 65, 1903; über festes Fluor Z. 16, 232, 1903. — [2]) Siehe auch Bredig, Physik. Zeitschr. 2, 433, 1901.

Nachstehende Tabelle von Zeuner gibt einige zusammengehörige Werte[1]):

Druck Atm.	Temperatur Celsius	Gewicht von 1 cbm kg	Volumen von 1 kg cbm	Wasserwärme	Innere latente Wärme	Äußere latente Wärme	Dampfwärme	Gesamtwärme
0,1	46,21	0,069	14,552	46,3	538,8	35,5	574,3	620,6
1	100,00	0,606	1,650	100,5	496,3	40,2	536,5	637,0
2	120,60	1,163	0,860	121,4	480,0	41,9	521,9	643,3
3	133,91	1,702	0,587	135,0	469,5	42,9	512,4	647,4
4	144,00	2,230	0,448	145,3	461,5	43,6	505,1	650,4
5	152,22	2,750	0,364	153,7	455,0	44,2	499,2	652,9
6	159,22	3,263	0,306	160,9	449,5	44,7	494,2	655,1
7	165,34	3,771	0,265	167,2	444,6	45,1	489,7	656,9
8	170,81	4,275	0,234	172,9	440,3	45,4	485,7	658,6
9	175,77	4,774	0,209	178,0	436,4	45,7	482,1	660,1
10	180,31	5,270	0,190	182,7	432,8	46,0	478,8	661,6
11	184,50	5,764	0,173	187,0	429,5	46,2	475,7	662,7
12	188,41	6,254	0,160	191,1	426,3	46,5	472,8	663,9
13	192,08	6,742	0,148	194,9	423,5	46,7	470,2	665,1
14	195,53	7,228	0,138	198,5	420,7	46,9	467,6	666,1

Zur Berechnung der Leistung einer Dampfmaschine hätte man zunächst aus Kolbenquerschnitt, Hubhöhe und Umdrehungszahl pro Sekunde die pro Sekunde

Fig. 3810.



[1]) Eine kurze Zusammenstellung der für Dampfmaschinen in Betracht kommenden Gesetze und Zahlen siehe H. Berg, Handbuch des Maschinentechnikers, Stuttgart 1901, S. 392.

verbrauchte Dampfmenge in Cubikmetern, hieraus das Dampfgewicht und die äußere latente Wärme zu bestimmen. Zur Demonstration kann ein größeres Dampfmaschinenmodell wie Fig. 3810 K, 960, dienen.

740. Versuche von Hirn. Die Arbeitsleistung eines thermodynamischen Motors, z. B. einer Dampfmaschine, ist nach Carnot (1824) zu vergleichen mit der eines Wassermotors.

Ebenso wie bei diesem pro Sekunde eine bestimmte Wassermenge durch eine gewisse Höhe heruntersinkt und demgemäß der Effekt sich berechnet als Produkt von Wassergewicht mit Wassergefälle, so sollte sich auch der Effekt einer Dampfmaschine ergeben als das Produkt der durch sie mit dem Dampf auf dem Wege vom Kessel zum Kondensator hindurchgehenden Wärmemenge, multipliziert mit dem Temperaturgefälle zwischen Kessel und Kondensator. Die Entdeckung der mechanischen Wärmetheorie machte diese Vermutung hinfällig. Die Wärme kann beim Durchgang durch die Dampfmaschine nicht wie das Wasser beim Durchgang durch den Wassermotor unverändert bleiben, es muß vielmehr die von der Maschine abgegebene Wärme kleiner sein als die aufgenommene und zwar um den Betrag des kalorischen Äquivalents der von der Maschine geleisteten Arbeit. Hirn hat dies durch seine Versuche bestätigt.

Zur Demonstration benutze ich eine einpferdige Dampfmaschine, deren Effekt mittels des Pronyschen Zaumes bestimmt wird. Die von der Maschine abgegebene Wärmemenge ergibt sich, indem die Menge des aus dem Kondensator pro Sekunde austretenden Kühlwassers multipliziert wird mit dessen Temperaturerhöhung; die aufgenommene Wärmemenge aus der Menge des pro Sekunde austretenden Dampfes multipliziert mit dessen Gesamtwärme. Die Bestimmung dieser Dampfmenge erfolgt einfach durch Auffangen des aus dem Kondensator, welcher als Oberflächenkondensator ausgeführt ist, austretenden Wassers in einem Maßcylinder; die Bestimmung der Gesamtwärme, ebenso wie die der Verdampfungswärme bei dem in Fig. 3101, S. 1179, abgebildeten Versuche, indem man den Dampf in ein auf der Wage stehendes Gefäß mit bekannter Wassermenge hineinleitet und Gewichtszunahme und Temperaturzunahme bestimmt. Zum Einleiten dient eine Messingkapillare, um den Dampf unter gleichem Druck einströmen lassen zu können, unter welchem er in die Dampfmaschine eintritt, ohne daß das Wasser herausgeblasen wird.

Beispielsweise wurde gefunden:

a) Gesamtwärme. In 30 Sekunden entstanden 0,23 kg Kondenswasser, also pro Sekunde 0,23/30 kg.

Beim Einleiten des Dampfes direkt aus dem Kessel in 1,5 kg Wasser bis zu einer Temperaturzunahme von 14° nahm das Wassergewicht zu um 0,04 kg. Somit ist die gesamte in die Dampfmaschine eintretende Wärmemenge

$$= \frac{0{,}23}{30} \cdot \frac{1{,}5 \cdot 14}{0{,}04} = 3{,}6 \text{ Kal. pro Sekunde.}$$

b) Austretende Wärme. Die Menge des Kühlwassers betrug 5 kg in 30 Sekunden, die Temperaturerhöhung 21°, somit ist die nicht verbrauchte Wärme

$$= 5 \cdot 21/30 = 3{,}5 \text{ Kal. pro Sekunde.}$$

c) Geleistete Arbeit. Der Pronysche Zaum war belastet mit 1,5 kg am Hebelarm 1,7 m. In 30 Sekunden erfolgten 100 Umdrehungen. Somit ist die

Arbeit $= 2\pi . 1{,}7 . 1{,}5 . 100/30 = 43$ Kilogrammeter pro Sekunde. Hieraus folgt das mechanische Wärmeäquivalent

$$x = \frac{43}{3{,}6 - 3{,}5} = 430 \text{ Kilogrammeter pro Kalorie.}$$

Zu einem weiteren ähnlichen Versuch benutze ich einen einpferdigen Gasmotor, welcher ebenso wie die Dampfmaschine beim vorigen Versuch auf Rollen gesetzt ist und leicht transportiert werden kann. Auch hier erfolgt die Messung des Effekts durch einen Pronyschen Zaum. Die Menge der von der Maschine pro Sekunde aufgenommenen Wärme ergibt sich durch Multiplikation des pro Sekunde einströmenden mit der Gasuhr gemessenen Gasvolums mit dem spezifischen Gewicht und der Verbrennungswärme.

Zur Messung der Wärme, welche die Maschine verläßt, wird das Kühlwasser derselben durch eine Gießkannenbrause von oben in einen etwa 2 m hohen und 0,2 m weiten mit Koksstücken angefüllten Blechcylinder geleitet, in welchen unten das Abgasrohr der Maschine einmündet, so daß das Kühlwasser auf seinem Wege über die Koksstücke auch die in dem Abgas enthaltene Wärmemenge aufnimmt. Die Menge der aus diesem Koksturm austretenden Wassermenge wird mit einem Maßcylinder bestimmt und mit der mittels eines Luftthermoskops bestimmten Temperaturerhöhung multipliziert. Beispielsweise war:

a) Die Gesamtwärme. In 60 Sekunden traten 25 Liter Leuchtgas vom spezifischen Gewicht 0,000 56 kg pro Liter und der Verbrennungswärme 5200 Kal. pro Kilogramm in die Maschine ein. Die gesamte eintretende Energie war somit

$$25/60 \times 0{,}00056 . 5200 = 1{,}2 \text{ Kal. pro Sekunde.}$$

b) Die austretende Wärme. In 60 Sekunden betrug die Menge des Kühlwassers 7 kg, dessen Temperaturerhöhung 8,2°, somit ist die nicht ausgenutzte Wärme

$$= 7 . 8{,}2/60 = 0{,}95 \text{ Kal. pro Sekunde.}$$

c) Die Arbeitsleistung. Der Pronysche Zaum war belastet mit 2,5 kg am Hebelarm 1,68 m, die Zahl der Umdrehungen betrug 100 in 25 Sekunden, somit die Arbeit

$$= 2\pi . 1{,}68 . 2{,}5 . 100/25 = 105 \text{ Kilogrammeter pro Sekunde.}$$

Hiernach ist das mechanische Wärmeäquivalent

$$x = \frac{105}{1{,}2 - 0{,}95} = 420 \text{ Kilogrammeter pro Kalorie.}$$


Fig. 3811.

Natürlich bezwecken diese Versuche keine Präzisionsmessungen, sondern sollen nur veranschaulichen und völlig klarstellen, daß ein Teil der Wärme beim Durchgang durch eine thermodynamische Maschine verschwindet und daß dieser der von der Maschine geleisteten mechanischen Arbeit äquivalent ist.

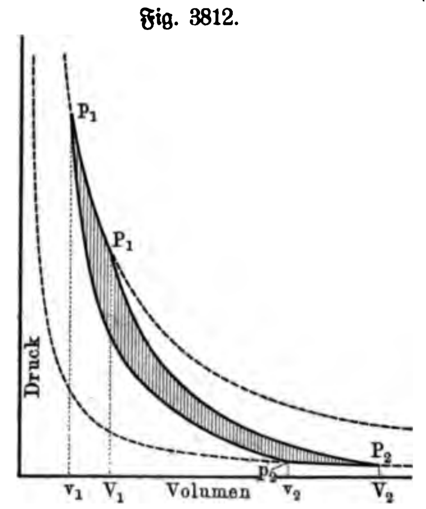
Bei einer Heißluftmaschine [1]) wird sodann berechnet, wie groß aufgenommene und abgegebene Wärme sind, falls dieselbe nach einem vollkommenen Carnotschen

[1]) Als Beispiel wird eine größere Maschine von Kirsten u. Co., Dresden, vorgeführt, sie ist ebenfalls auf Rollen gesetzt. Ferner benutze ich zur schematischen Darstellung den Apparat Fig. 3811 (K, 6) in Verbindung mit drei Holzklötzen, welche bezw. rot, weiß und blau angestrichen sind (heiß, wärmeundurchlässig, kalt).

Kreisprozeß arbeitet. Es ergibt sich der Satz, daß aufgenommenes und abgegebenes Wärmegewicht gleich sind und, ganz analog wie bei einem Wassermotor, der Effekt sich bestimmt als Produkt des pro Sekunde hindurchgehenden Wärmegewichts multipliziert mit dem Temperaturgefälle (Satz von Clausius), oder daß die Arbeit einer solchen Maschine nicht gleich ist dem Äquivalent der aufgenommenen Wärme, sondern nur einem Bruchteil derselben, welcher sich ergibt, indem man das Temperaturgefälle dividiert durch die absolut höchste Temperatur.

Ist nämlich (Fig. 3812) das Anfangsvolumen der Luft, deren Menge 1 kg betragen möge, v_1 Cubikmeter, das Volumen nach der isothermen Expansion im Kontakt mit der Wärmequelle (Temperatur τ_1) V_1, also die aufgenommene Wärmemenge

Fig. 3812.



$$Q_1 = \frac{1}{427} \cdot R \cdot \tau_1 \log nat\, V_1/v_1;$$

ferner das Volumen nach der adiabatischen Expansion V_2, das Volumen nach der isothermen Kompression in Berührung mit der Kältequelle (Temperatur τ_2) v_2, somit die abgegebene Wärmemenge

$$Q_2 = \frac{1}{427} \cdot R \cdot \tau_2 \log V_2/v_2,$$

so folgt der Gleichung der Adiabaten:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1},$$

daß $V_1 : V_2 = v_1 : v_2$ und $Q_1 : Q_2 = \tau_1 : \tau_2$ oder $Q_1/\tau_1 = Q_2/\tau_2$.

Die verschwundene Wärme beträgt $Q_1 - Q_2$, also die Arbeit pro Umdrehung:

$$L = 427(Q_1 - Q_2) = 427\, Q_1 \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1} = 427 \frac{Q_1}{\tau_1}(\tau_1 - \tau_2) \text{ Kilogrammeter.}$$

Der Wirkungsgrad, d. h. das Verhältnis der in Arbeit umgesetzten Wärmemenge zur gesamten aufgenommenen Wärmemenge beträgt also $(\tau_1 - \tau_2)/\tau_1$, aber das aufgenommene Wärmegewicht Q_1/τ_1 ist gleich dem abgegebenen Q_2/τ_2.

741. **Zweiter Hauptsatz.** Während der erste Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie aussagt, daß bei Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit pro Kalorie 427 Kilogrammeter potentielle oder kinetische Energie gewonnen werden, zeigte sich bei der eben behandelten Heißluftmaschine, daß dieser Satz keineswegs so aufzufassen ist, daß die gesamte der Maschine zugeführte Wärme auch wirklich in Arbeit umgesetzt wird, daß vielmehr nur ein verhältnismäßig kleiner Teil der Wärme in Arbeit umgewandelt wird, für welchen der Satz allerdings zutrifft, daß aber weitaus der größte Teil der aufgenommenen Wärme die Maschine unverändert wieder verläßt. Es wäre also ein großer Fehler, wollte man die Arbeit einer solchen Maschine so berechnen, daß man einfach die aufgenommene Wärme mit 427 multipliziert.

Nur in einem Falle würde dies zutreffen, dann nämlich, wenn das Temperaturgefälle gleich der absolut gemessenen höchsten Temperatur, d. h. die niedrigste Temperatur der absolute Nullpunkt wäre; ein Fall, der sich in Wirklichkeit nicht herstellen läßt.

Das erwähnte Resultat wurde gefunden für eine ganz besondere Form der Heißluftmaschine. Es wäre denkbar, daß es andere thermodynamische Motoren gäbe, für welche der Wirkungsgrad (d. h. das Verhältnis der in Arbeit umgesetzten Wärmemenge zur gesamten aufgenommenen Wärmemenge) sich günstiger gestaltete.

Der Inhalt des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie ist der, daß das nicht der Fall ist, daß vielmehr für jede beliebige thermodynamische Maschine, falls sie vollkommen nach einem Carnotschen Kreisprozeß arbeitet, der Wirkungsgrad derselbe ist wie für die Heißluftmaschine, für jede andere unter allen Umständen kleiner.

Um diesen Satz zu beweisen ist es notwendig, zunächst die Tätigkeit einer Carnotschen Maschine zu betrachten, wenn sie umgekehrt arbeitet, d. h. wenn sie als Kompressor betrieben wird und auf Kosten von mechanischer Arbeit Wärme erzeugt. Während sie bei normalem Betriebe aus dem Feuertopf Wärme aufnimmt, da sich das Gas ausdehnt und dabei abkühlt, wird bei umgekehrtem Betriebe, da sich das Gas infolge der Kompression erwärmt, umgekehrt Wärme an den Feuertopf abgegeben. Während bei normalem Betriebe sich das Gas, wenn es mit dem Kühlmantel in Berührung kommt, zusammenzieht und die bei der Verdichtung entstandene Wärme an das Kühlwasser abgibt, findet beim umgekehrten Betriebe das Gegenteil statt, das Gas wird infolge der Volumenvergrößerung beim Herausziehen des Kolbens (infolge der Expansion) kälter und entzieht dem Kühlwasser Wärme, so daß dieses noch kälter wird als es schon war. Würde man es durch eine Chlormagnesiumlösung ersetzen, welche durch eine Pumpe in Zirkulation gehalten und dabei um Wasserbehälter herumgeleitet wird, so könnte unter günstigen Umständen die Temperatur dieser Salzlösung so weit sinken, daß das Wasser in den Behältern gefriert, man hätte eine mit Luft betriebene Eismaschine. (Vergl. S. 139, § 32.) Beim umgekehrten Betrieb verhält sich also die Heißluftmaschine als Kaltluftmaschine oder Kältemaschine[1]). Man wird allerdings, wollte man sie wirklich als solche benutzen, natürlich keine Feuerung an dem Feuertopf anbringen, im Gegenteil diesen durch einen Kühlmantel ebenfalls auf möglichst niederer Temperatur halten, da ja die Feuerung den erzielten Kältegrad ungünstig beeinflussen müßte.

Es läßt sich nun zeigen, daß für diesen umgekehrten Betrieb der Heißluftmaschine genau dieselbe Formel gilt, wie für den direkten, d. h. die zum Betrieb erforderliche mechanische Arbeit ist das Äquivalent der von ihr erzeugten Wärme; das aufgenommene Wärmegewicht ist gleich dem abgegebenen, die verbrauchte Arbeit also gleich dem Produkt von Wärmegewicht mal Temperaturgefälle, oder gleich der abgegebenen Wärme mal dem Quotienten von Temperaturgefälle und höchster Temperatur, welcher den Wirkungsgrad darstellt (d. h. das Verhältnis der durch die Arbeitsleistung gewonnenen Wärme zur gesamten abgegebenen Wärme).

Denkt man sich nun zwei genau gleiche derartige Maschinen so miteinander gekuppelt, daß die Arbeit, welche die direkt laufende erzeugt, dazu dient, die umgekehrt laufende zu treiben und beide mit derselben Feuerung und Kühlleitung betätigt, so wird die Wärme, welche die erste der Feuerung entzieht durch die zweite zurückgegeben und die Wärme, welche die erste an die Kühlleitung abgibt, durch die zweite wieder entzogen. Wären keine Reibungswiderstände u. s. w. vorhanden, so könnte dieses System der beiden Maschinen als Perpetuum mobile in infinitum

[1]) Die Kältemaschinen werden in Verdampfungsmaschinen und Kaltluftmaschinen eingeteilt.

weiter im Gange bleiben, in Wirklichkeit wäre es aber nicht im stande, die an ein wirkliches Perpetuum mobile zu stellende Anforderung, fortwährend Arbeit zu leisten, zu erfüllen, und würde der Reibungswiderstände wegen auch bald zum Stillstand kommen.

Gäbe es nun aber irgend eine andere nach Carnotschem Prinzip arbeitende Maschine, für welche bei gleicher Arbeitsleistung die aufgenommene und somit — da die Differenz der Arbeit äquivalent sein muß — auch die abgegebene Wärme eine andere wäre als für die Heißluftmaschine, so würde bei Verkuppelung derselben mit einer Heißluftmaschine, derart, daß die Maschine, welche bei direktem Betrieb mehr Wärme aufnimmt, umgekehrt betrieben wird, der Feuerung mehr Wärme zugeführt als sie an die direkt arbeitende Maschine abgibt und entsprechend der Kühlleitung mehr Wärme entzogen. Es würde, wie sich Clausius ausdrückt, die Wärme von selbst von der Kühlleitung zur Feuerung übergehen. Wäre dies aber möglich, so könnte man eine dritte gewöhnliche Heißluftmaschine beifügen, welche, indem sie diesen Wärmeüberschuß der Feuerung zur Kühlleitung wieder zurückleitet, soviel Arbeit erzeugt, daß damit nicht nur die Reibungsverluste der beiden ersten Maschinen gedeckt, sondern auch in infinitum, falls man nur die Dimensionen entsprechend wählt, jede beliebige nützliche Arbeit geleistet werden könnte; das Problem des Perpetuum mobile wäre gelöst.

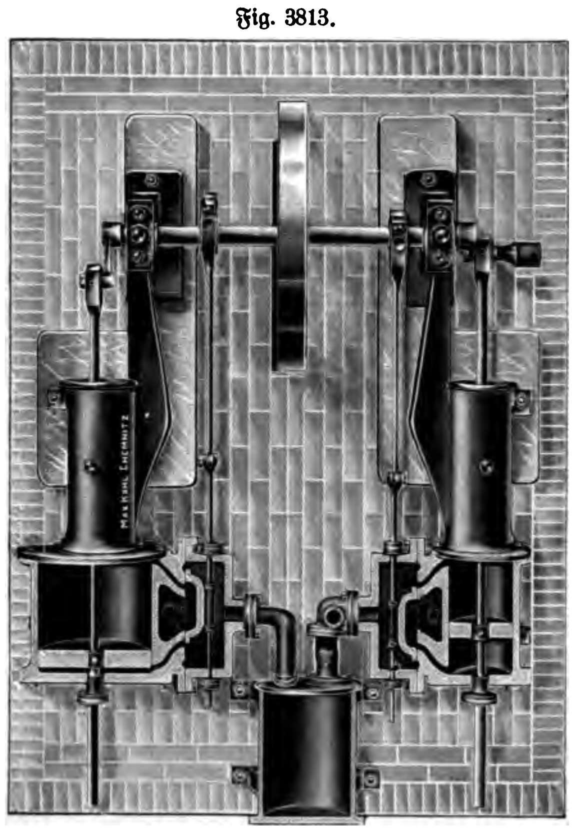
Nachdem nun alle Versuche, ein Perpetuum mobile herzustellen, mißglückt sind, ist man (zuerst Clausius) zu dem Ergebnis gekommen, welches eben den Inhalt des zweiten Hauptsatzes bildet, daß es keine thermodynamische Maschine geben kann, welche nach anderem Gesetz arbeitet als die Heißluftmaschine, oder allgemein gesprochen, daß die Wärme niemals von selbst von einem kalten auf einen heißen Körper übergehen könne, d. h. nicht ohne daß (wie bei der Kältemaschine) mechanische Arbeit dazu verbraucht würde, oder daß wie bei der Wärmeerzeugung durch Reibung beim Bremsen einer thermodynamischen Maschine gleichzeitig eine weitaus größere Wärmemenge von hoher Temperatur auf niedere heruntersinken würde, ähnlich wie ja auch bei einem Stoßheber oder bei einer Kombination von Wasserrad und Druckpumpe das Wasser nicht von selbst auf höheres Niveau kommt, sondern dadurch, daß gleichzeitig eine weitaus größere Wassermenge auf niedrigeres Niveau sinkt (siehe S. 1428, § 656).

Die Richtigkeit dieses Satzes wurde vielfach bestritten. Maxwell z. B. denkt sich ein Gefäß, welches Luft enthält, durch eine Scheidewand in zwei Teile geteilt und in dieser Scheidewand Löcher angebracht, groß genug, um einzelne Moleküle durchzulassen, und daneben kleine Heinzelmännchen (Dämonen) postiert, welche die Löcher schließen und öffnen können und so instruiert sind, daß sie Moleküle von großer Geschwindigkeit nur nach der einen, solche von geringer Geschwindigkeit nach der anderen Seite passieren lassen. Dann muß natürlich nach einiger Zeit, im Widerspruch zum zweiten Hauptsatz, eine Temperaturdifferenz der beiden Hälften entstanden sein, welche ermöglicht, einen thermodynamischen Motor zu treiben. Man kann hieraus schließen entweder, daß der zweite Hauptsatz falsch ist, oder aber die kinetische Gastheorie oder aber die Annahme, daß es solche Heinzelmännchen geben könne, wie sie Maxwell voraussetzt, und dies letztere ist wohl das Richtige, eben weil jede Materie — und Körper müßten die Heinzelmännchen doch wohl haben, um Kräfte ausüben zu können — aus Molekülen besteht, so daß die Größe eines Lebewesens nicht unter ein bestimmtes Maß heruntergehen kann.

Andere Einwände, die z. B. auf die Arbeitsleistungen der Tiere und des Menschen sich gründeten, deren Körpertemperatur, wie z. B. bei den Fischen, nur unerheblich von der der Umgebung abweicht, sind hinfällig, weil außer Betracht gelassen wurde, daß hier nicht direkt Wärme, sondern chemische Energie in Arbeit umgesetzt wird, welche allerdings ihre Entstehung der Sonnenwärme verdankt, wobei aber die sehr hohe Temperatur der Sonne die höchste Temperatur des Temperaturgefälles ist [1]).

742. **Die absolute Temperaturskala** nach W. Thomson (1848). Eine Carnotsche Maschine nehme bei der Temperatur τ_1, etwa dem Siedepunkt des Wassers, Wärme auf und gebe bei einer anderen Temperatur τ_2, etwa dem Gefrierpunkt des Wassers, Wärme ab. Ist η der in Arbeit verwandelte Teil der aufgenommenen Wärmemenge, so ist $\eta = (\tau_1 - \tau_2)/\tau_1$, also $\tau_2 = \tau_1 (1 - \eta)$. Hat man also einen Fixpunkt der Temperaturskala angenommen, so kann jeder beliebige andere Punkt der Skala τ_2 seinem Werte nach bestimmt werden, unabhängig von den Eigenschaften irgend eines bestimmten Stoffes, da der zweite Hauptsatz allgemein gültig ist.

Fig. 3813.



743. **Thermodynamische Maschinen.** Von großer Bedeutung ist der zweite Hauptsatz für die Technik der thermodynamischen Maschinen. Es ist durch denselben klar gelegt, daß der Wirkungsgrad immer nur ein verhältnismäßig geringer sein kann, daß die Vollkommenheit der Konstruktion somit nicht nach dem absoluten Wirkungsgrade beurteilt werden darf, sondern nach dessen Verhältnis zu dem einer vollkommenen Carnotschen Maschine, dem sogenannten Güteverhältnis.

[1]) Insofern chemische Energie eine Art potentieller Energie darstellt, läßt sie sich vollständig in mechanische Arbeit umsetzen, wenn es gelingt, die Entstehung von Wärme zu vermeiden, was in der Tat z. B. beim Betrieb eines Daniellschen Elements möglich ist. Die Bestrebungen, die chemische Energie der Kohle in dieser Weise direkt in Arbeit umzusetzen, wodurch natürlich mit einem Schlage alle Dampfmaschinen, die ja höchstens nur 10 Proz. der Energie in Arbeit umzusetzen vermögen, beseitigt und unserer ganzen Kultur andere Bahnen gewiesen würden, sind bisher ohne Erfolg geblieben. Immerhin ist wohl zu beachten, daß sich der zweite Hauptsatz nur auf die Umwandlung von Wärme, nicht von chemischer Energie bezieht.

Er weist ferner die Wege, auf denen eine Besserung dieses Güteverhältnisses möglich ist, wie z. B. durch **mehrstufige Expansion** mit **Receiver** (Dampfsammler zwischen Hoch- und Niederdruckcylinder, Fig. 3813 K, 300), Verwendung anderer Flüssigkeiten statt Wasser, Erweiterung der Temperaturgrenzen u. s. f.

Zur experimentellen Bestimmung des Güteverhältnisses dienen die **Indikatoren**, unter welchen der bekannteste wohl der **Tompson-Indikator** (Fig. 3814 und 3815)[1] ist. Die Konstruktion beruht auf dem Satze, daß der Flächeninhalt des von den Druckkurven (Isothermen, Adiabaten u. s. w.) eingeschlossenen Diagramms (S. 1536), welches die Zustandsänderungen während eines Spiels der Maschine darstellt, direkt die

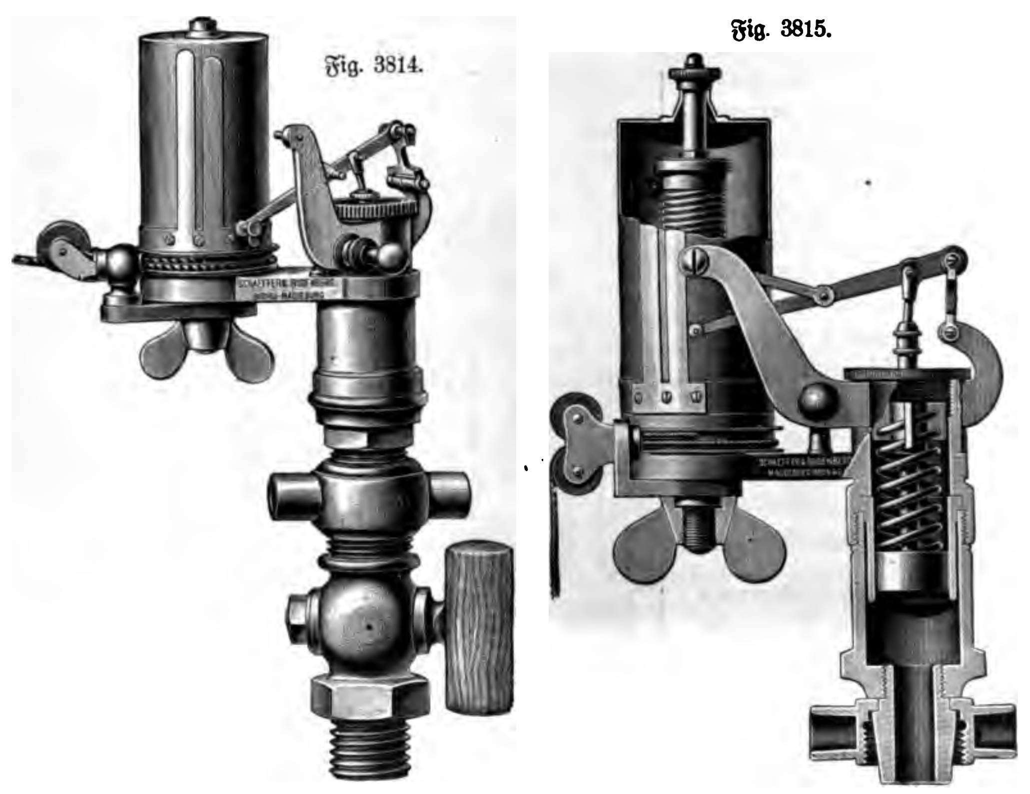


Fig. 3814.

Fig. 3815.

ganze (**indizierte**) Arbeit der Maschine gibt, d. h. die Summe der nutzbaren (**effektiven**) Arbeit, welche mittels des **Pronyschen** Zaums gemessen wird, und der verlorenen, welche zur Überwindung der Reibungswiderstände im Inneren der Maschine dient.

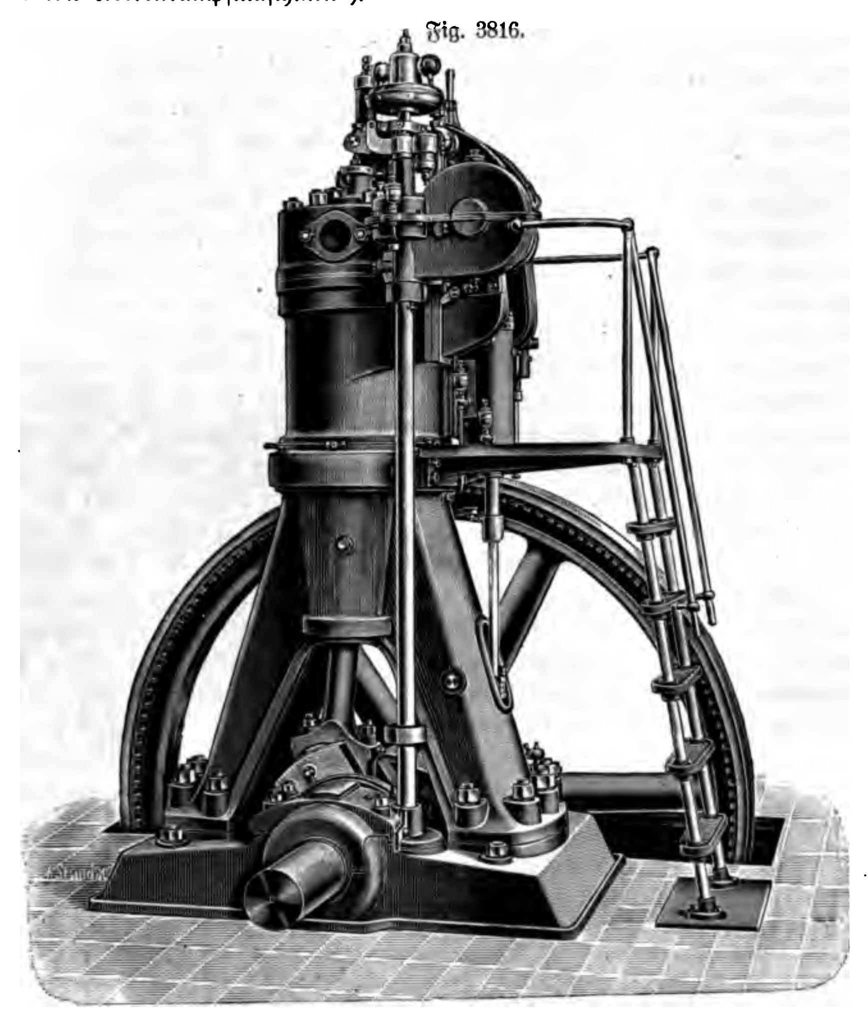
Die Kurven werden aufgezeichnet auf ein Papierblatt auf einer rotierenden Trommel, deren Bewegung durch die Kolbenstange veranlaßt wird, da sie mit dieser durch eine Schnur verbunden ist. Die Schreibspitze befindet sich an einem Hebel, welcher sich entsprechend der Größe des Druckes auf- und abbewegt, da er mit einem Kolbenmanometer in Verbindung gesetzt ist, welches den Druck im Inneren des Cylinders mißt[2].

[1] Zu beziehen von **Schaeffer** u. **Budenberg**, Magdeburg-Buckau, zu 175 bis 195 Mk. — [2] Andere Bezugsquellen von Indikatoren sind: **Dreyer, Rosenkranz** u. **Droop**, Armaturenfab., Hannover; **Eckert** u. **Hamann**, Werkstätte f. Präzisionsmechanik, Friedenau b. Berlin, Hedwigstr. 17; **H. Maihak**, Grosby-Warenhaus, Hamburg; **C. D. Gähler**, Manometerbauanstalt, Hamburg, Spaldingstr. 57.

Gewöhnlich beträgt der Dampfverbrauch pro Pferdekraft-Stunde 4,2 bis 15 kg bei 8 bis 15 Atm. Überdruck, die Ausnutzung des Brennmaterials 65 bis 78 Proz., die normale Verdampfung, d. h. die pro Kilogramm Kohle erzielte Dampfmenge in Kilogrammen 10 bis 25 [1]).

Dampfturbinen (S. 105 u. 1463, Fig. 3688) haben ähnlichen Wirkungsgrad wie Kolbendampfmaschinen [2]).

Fig. 3816.



Durch Vorerhitzung des Dampfes kann derselbe bei beiden Maschinenarten gesteigert werden [3]).

Bei Gasmotoren können ungefähr 33 Proz. Wärmeausnutzung erzielt werden, bei Benzin- und Petroleummotoren nur 22 Proz., da man wegen der leichteren Entzündlichkeit der Dämpfe die Kompression des Dampf-Luft-Gemisches vor der Zündung nicht über den Verdichtungsgrad 4 treiben kann [4]).

---

[1]) Siehe auch Zeuner, Technische Thermodynamik, Leipzig 1900, Arthur Felix. — [2]) Siehe Stodola, Die Dampfturbinen, 3. Aufl. Berlin 1905, Springer. — [3]) Elektrodampfturbinen liefert die Gesellschaft für elektrische Industrie, Karlsruhe (Baden). — [4]) Nach E. Meyer, Naturw. Rundschau 19, 651, 1904.

Besonders billiger Betrieb (Verbrauch an Rohöl 200 bis 230 g pro gebremste Pferdekraft und Stunde) wurde erzielt bei den Diesel-Motoren (Fig. 3816[1]).

744. Dampfspannung. Außerordentlich mannigfaltig sind ferner die Nutzanwendungen auf dem Gebiete der Molekularphysik, physikalischen Chemie und Atomtheorie. Schon einfach aus der ursprünglichen Form des zweiten Hauptsatzes, dem Satz der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile lassen sich Gesetze über die Molekulareigenschaften der Stoffe gewinnen. So kann man z. B. nach W. Thomson schließen, daß die Dampftension einer Flüssigkeit an der konkaven Oberfläche derselben im Kapillarrohr kleiner sein muß als an der ebenen Oberfläche, um den Betrag des Druckes der Dampfsäule von gleicher Höhe, da sonst außen infolge dieses Druckes der innen gebildete Dampf sich kondensieren und so beständige Strömung der Flüssigkeit eintreten müßte. Ebenso muß an einer konvexen Oberfläche die Dampftension größer sein; ist somit keine ebene Flüssigkeitsoberfläche in Berührung mit dem Dampf, so wird ein Kondensationsverzug eintreten, der im allgemeinen nur durch Kondensationskerne (Staub, Jonen) verhindert wird. In gleicher Weise ergibt sich die Dampftensionserniedrigung von Lösungen.

Man denke sich den Apparat Fig. 2516, S. 885, luftdicht mit einer Glasglocke überdeckt, welche mit gesättigtem Wasserdampf erfüllt ist, und die Flüssigkeitssäule in dem Rohr *aa* so hoch, daß gerade Gleichgewicht vorhanden ist. Wäre die Dampftension dieser Lösung (es sei Lösung von Rohrzucker in Wasser) ebenso groß wie die des reinen Wassers, so wäre der Druck unten im Apparat größer um das Gewicht einer Dampfsäule von gleicher Höhe wie die der Flüssigkeit. Es müßte sich also unten beständig Wasserdampf verdichten, wodurch oben der Druck geringer wird, so daß dort Verdampfung eintreten muß, und die verdampfte Menge würde dann durch den Vorgang der Osmose wieder ersetzt. Man hätte also ein Perpetuum mobile; die Annahme kann somit nach dem zweiten Hauptsatz nicht richtig sein. Die Dampftension über der Zuckerlösung p' muß vielmehr niedriger sein als die des Wassers p, wenn Gleichgewicht bestehen soll, und zwar um den Druck der betrachteten Dampfsäule. Da nun für Wasserdampf, wie für jedes Gas, $pv = 0{,}0821 . \tau$, folgt, da 1 Mol Wasser = 18 g, das Volumen von 18 g Wasserdampf $v = 0{,}0821 . \tau / p$ Liter oder das Gewicht von

$$1 \text{ ccm} = \frac{18}{1000} \cdot \frac{p}{0{,}0821 . \tau} \text{ Gramm,}$$

[1]) Zu beziehen von der Vereinigten Maschinenfabrik Augsburg und Maschinenbaugesellschaft Nürnberg, A.-G., Werk Augsburg und L. A. Riedinger, Maschinen- und Bronzewarenfabrik, A.-G., Augsburg. Beträchtliche Leistungen bei sehr geringer Größe ergeben die Benzinmotoren (siehe Vogel, Schule des Automobilfahrers, Berlin 1900, G. Schmidt). Heißdampflokomobilen von R. Wolf in Magdeburg-Buckau (verbrauchen pro Pferdekraft-Stunde 0,56 bis 0,63 kg Kohle). Sauggasmotoren (Gasmotorenfabrik Deutz) (vergl. S. 102) arbeiten mit billigem Brennstoff, z. B. verbrauchen solche der Güldner-Motorengesellschaft, München IX, pro Pferdekraft-Stunde 0,33 kg Anthracit. Dies ist auch der Vorzug des „Dieselmotors", zu dessen Betrieb billiges Rohöl dient. Die Luft wird zunächst auf 35 Atm. verdichtet, wobei ihre Temperatur auf 500° C steigt. In diese hocherhitzte Luft wird das Öl langsam eingespritzt, welches sich ohne besondere Zündvorrichtung entzündet. Man erreicht so 33 Proz. Wärmeausnützung. Über Turbinengasmaschinen siehe Schreber, Zeitschr. f. d. gesamte Turbinenwesen 1, 177, 1904. Über thermodynamische Maschinen überhaupt: J. Weyrauch, Grundriß der Wärmetheorie, Stuttgart 1905, Wittwer. (Darin ist auch der Mensch als thermodynamische Maschine betrachtet.)

somit, wenn h die Steighöhe in aa, der Druck der fraglichen Dampfsäule (gleichmäßige Dichtigkeit angenommen)

$$p'' = \frac{18 \cdot p \cdot h}{82{,}1 \cdot \tau \cdot 76 \cdot 13{,}5} \text{ Atm.}$$

Dies ist also die Erniedrigung, welche die Dampftension p des Wassers erfährt durch den Zusatz von Zucker, d. h. die Tension p' der Zuckerlösung ist $= p - p''$.

745. **W. Thomsons Satz.** Mit besonderem Vorteil wird der zweite Hauptsatz in der zuletzt betrachteten Carnot-Clausiusschen Form auch auf Probleme der physikalischen Chemie angewendet.

Da die Art der Substanz, mit welcher eine thermodynamische Maschine betrieben wird, bezüglich des Satzes, welcher ihre Arbeitsleistung bestimmt, gleichgültig ist, so kann man eine Menge von Beziehungen zwischen physikalischen Konstanten finden, je nach der gewählten Substanz. So ergibt sich für eine verdampfende Flüssigkeit eine Beziehung zwischen Verdampfungswärme, Dampfdichte und Änderung der Spannkraft mit der Temperatur; für einen sich lösenden Körper die Änderung der Löslichkeit mit der Temperatur in Beziehung zur Lösungswärme; für einen schmelzenden festen Körper eine Beziehung zwischen Schmelzwärme, Volumänderung beim Schmelzen und Änderung des Schmelzpunktes mit dem Druck; für enantiotrope Modifikationen eine Beziehung zwischen Umwandlungswärme, Volumänderung und Änderung der Umwandlungstemperatur durch Druck; für einen elastisch gedehnten Körper Beziehungen zwischen Dehnung und auftretender Wärme (elastische Hysteresis), ebenso bei Kompression von Flüssigkeiten u. s. w.

Ein aus unendlich kleinen Zustandsänderungen zusammengesetztes Diagramm eines Carnotschen Kreisprozesses kann als Parallelogramm betrachtet werden, dessen Inhalt $= dp \cdot dv$ ist. Da es die Arbeit darstellt und diese das 427fache des aufgenommenen Wärmegewichtes dQ/τ mal dem Temperaturgefälle $d\tau$ sein muß, so hat man

$$dp \cdot dv = 427\, dQ/\tau \cdot d\tau \quad \text{oder} \quad d\tau = \frac{1}{427} \cdot \frac{\tau \cdot dp \cdot dv}{dQ} \quad \text{(W. Thomsons Satz).}$$

746. **Temperaturänderungen bei elastischer Deformation.** Um die Abkühlung von Drähten durch Druck zu demonstrieren, genügt es nach Haga (Wied. Ann. 15, 1, 1882), einen dünnen Draht aus anderem Metall um den zu dehnenden zu wickeln und beide mit einem empfindlichen Galvanometer zu verbinden. Die beiden Drähte stellen ein Thermoelement dar. Zur Demonstration könnte vielleicht eine Art Dampftensionsthermometer gebraucht werden.

747. **Temperaturänderungen von Flüssigkeiten durch Druck.** Der Nachweis dieser Erscheinung kann mit Hilfe von Cailletets Pumpe geschehen, so wie früher (vgl. S. 890, § 227) die Änderung der Löslichkeit mit dem Druck durch das Wachsen von Kristallen unter dem Mikroskop demonstriert wurde.

Komprimiert man nämlich rasch bei einer Substanz, deren Kristalle durch Druck größer werden müssen, so sieht man sie zunächst kleiner werden infolge der durch den Druck hervorgerufenen Temperaturerhöhung, welche die Löslichkeit vergrößert (S. 1132). Erst nachdem sich die Temperatur wieder mit der Umgebung ausgeglichen

hat, beginnt das Wachsen. Ebenso werden bei einem Tröpfchenniederschlag in einer Flüssigkeit die Tröpfchen zunächst kleiner. Besonders die letztere Erscheinung eignet sich zur Demonstration.

Die Zusammendrückbarkeit des Wassers, welche bei 18° 0,000 046 CGS beträgt, ändert sich bei 1° Temperaturzunahme um $-0{,}2.10^{-6}$; diejenige von Äther (0,000110) um $+0{,}7.10^{-6}$.

Bei **Messung hoher Flüssigkeitsdrucke** ist die Kompressionswärme zu beachten, d. h. mit der Beobachtung bis zum wieder erfolgten Temperaturausgleich zu warten.

748. Umwandlungstemperatur und Druck. Für den Fall der Verdampfung ist, wenn r die latente Verdampfungswärme pro Kilogramm und u die Volumänderung von 1 kg Flüssigkeit beim Übergang in den Dampfzustand $dQ/dv = r/u$, somit

$$dp = \frac{427.r}{\tau.u}\cdot d\tau.$$

Dies ist die Differentialgleichung der Dampftensionskurve, denn sie gibt den Zuwachs der Dampftension dp, wenn die Temperatur um $d\tau$ wächst. Ist die Dampftensionskurve bekannt, so kann man also aus der Gleichung die Verdampfungswärme oder die Volumänderung finden.

Beispielsweise ist für Wasser bei 100° $r = 536{,}5$ Kal., das spezifische Volumen des gesättigten Wasserdampfes = 1,658 cbm, das des Wassers = 0,001 cbm, somit $u = 1{,}657$ cbm. Hieraus folgt

$dp/d\tau = \frac{427.536{,}5}{373.1{,}657} = 370$ kg pro Quadratmeter = 0,0357 Atm. = 27,17 mm pro Grad. Gewöhnlich kann man das Flüssigkeitsvolum gegen das des Dampfes vernachlässigen und letzteres nach den Gasgesetzen berechnen, so daß $v = \frac{R\tau}{p}$, also da $R = 0{,}0821$ Liter-Atm. pro Grad und 1 Liter-Atm. = 24,25 g-cal, somit $R = 1{,}991$ g-cal/Grad, $v = 1{,}991.\tau/p$ und da $r = \frac{\tau.v}{427}\cdot\frac{dp}{d\tau}$, die Verdampfungswärme pro Mol

$$\lambda = 1{,}991.\tau^2\cdot\frac{dp}{p.d\tau} = 1{,}991\cdot\tau^2\,\frac{d\ln p}{d\tau}\ \text{Grammcalorien.}$$

Für den Fall der **Schmelzung** ergibt sich ebenso $d\tau = \frac{\tau}{427}\cdot\frac{u}{r}\cdot dp$, wenn r die latente Schmelzwärme pro Kilogramm, τ die Schmelztemperatur nach absoluter Skala und u die Volumänderung pro Kilogramm bedeuten.

Beispielsweise beträgt für Wasser $r = 80{,}3$ Kal., das spezifische Volumen des Wassers 0,001 cbm, das des Eises 0,001 091 cbm und $\tau = 273°$. Hieraus folgt $d\tau = -0{,}0077.dp$ als Gefrierpunktsänderung bei Zunahme des Druckes um 1 Atm.

Für den Fall der **Polymorphie** bedeutet r die Umwandlungswärme. Beispielsweise ist für Schwefel $\tau = 273 + 95{,}6°$, $u = 0{,}000014$, $r = 2{,}52$. Hieraus folgt $d\tau/dp = 0{,}049$ Grad pro Atm.

Zur analogen Behandlung chemischer Umsetzungen dienen die weiter unten abzuleitenden Sätze von der Reaktionsisotherme (S. 1551) und Reaktionsisochore (S. 1553).



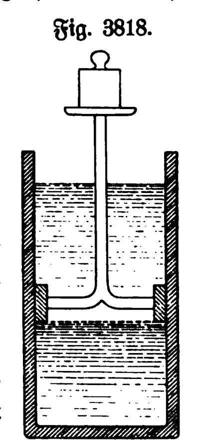
749. Osmotischer Druck und Molekulargewichtsbestimmungen. Besonders interessante thermodynamische Motoren sind, wie van't Hoff gezeigt hat, diejenigen, welche betrieben werden durch den osmotischen Druck, insofern sich dabei in Übereinstimmung mit der kinetischen Theorie des osmotischen Druckes ergibt, daß derselbe ebensogroß sein muß, wie wenn dieselbe Substanzmenge in gasförmigem Zustande auf den gleichen Raum verdichtet wäre, so daß es möglich ist, gemäß dem Avogadroschen Gesetze Schlüsse auf das Molekulargewicht gelöster Körper zu ziehen. Weiter ergeben sich Beziehungen zur Erniedrigung des Gefrierpunktes bei Auflösung eines festen Körpers in einer Flüssigkeit, sowie der Erhöhung des Siedepunktes oder Erniedrigung der Dampftension, so daß es möglich wird, auch mittels dieser Gefrier- und Siedepunktsänderungen Molekulargewichtsbestimmungen vorzunehmen und dadurch mannigfache Aufklärung über die atomistische Konstitution der Materie zu erhalten.

Fig. 3817.



Wird (nach Nernst) die Blase bei dem Apparat Fig. 2516, S. 885, mit Wasser durchtränkt, das Gefäß mit Benzol gefüllt und in Äther hineingestellt, nachdem beide mit Wasser gesättigt sind, damit sie der Blase das Wasser nicht entziehen können, so wandert der Äther, da er im Wasser schwach löslich ist, durch die Blase zum Benzol, während das in Wasser unlösliche Benzol nicht herausbringen kann. Man beobachtet deshalb ein rasches Steigen der Flüssigkeit in dem Rohr *aa*, welches in der Stunde mehr als 1 dcm betragen kann[1]).

Fig. 3818.



Würde man nach Fig. 3818 Benzol in einem cylindrischen Gefäß durch einen beweglichen, aus einem mit nasser Blase überspannten Rahmen bestehenden Kolben abschließen und diesen mit Äther überschichten, so kann wieder der Äther leicht durch die Membran nach unten diffundieren, während das Benzol in seinem Bestreben, nach oben zu gelangen, einen Druck auf den Kolben ausübt und diesen hebt, wenn er nicht durch ein dem osmotischen Druck entsprechendes Gewicht beschwert wird. Ist bereits Äther nach unten gedrungen, so wird er beim Auflegen des Gewichtes wieder nach oben gepreßt. Man kann somit einen derartigen halbdurchlässigen Kolben auch dazu benutzen, unter Aufwendung mechanischer Arbeit gemischte Flüssigkeiten wieder zu trennen, und zwar ist die Trennungsarbeit in Kilogrammetern gleich dem osmotischen Druck in Kilogrammen pro Quadratmeter multipliziert mit

[1]) Zu messenden Versuchen kann der Apparat von Pfeffer (Fig. 2517, S. 886) dienen, zu beziehen von E. Gundelach in Gehlberg in Thüringen nach Fig. 3817 zu 10,50 Mk

dem Volumen in Cubikmetern, um welches sich der Kolben verschoben hat, genau ebenso wie die Arbeit zur Kompression eines Gases.

Man kann sich auch nach van't Hoff vorstellen, daß die Ursache des osmotischen Druckes ganz dieselbe ist wie die des Gasdruckes, nämlich die Wirkung der von den Flüssigkeitsmolekülen ausgeübten Stöße. Daß sich diese Moleküle bewegen, beweisen die Diffusionserscheinungen. Daß sie unter gewöhnlichen Umständen keinen Druck auf den Kolben ausüben, sondern erst nach Aufschichtung des Äthers, beruht darauf, daß der Binnendruck (vgl. § 175, S. 850) sehr viel größer ist. Durch Aufschichtung des Äthers wird dessen Angriffsfläche an die Oberfläche des Äthers verlegt, so daß der Bewegung der Benzolmoleküle nur noch die für sie undurchlässige Membran des Kolbens entgegensteht.

Daß der Druck gerade gleich dem Gasdruck sein muß, erkennt man, indem man zunächst nur gasförmiges Benzol unter dem Kolben befindlich annimmt. Die Belastung des letzteren muß natürlich nun dem Gasdruck entsprechen. Hieran ändert sich nichts, wenn man über und unter dem Kolben Äther hinzufügt, welcher den Kolben frei durchdringen kann.

Haben die Benzolmoleküle im flüssigen Zustande dasselbe Molekulargewicht wie im gasförmigen, so ist zu erwarten, daß auch der osmotische Druck genau derselbe sein wird, wie wenn dieselbe Benzolmenge in dampfförmigem Zustande auf den Raum unter dem Kolben zusammengedrückt wäre, mag dieser von reinem Benzol oder von einer Mischung mit Äther erfüllt sein. Je mehr Äther hindurchdiffundiert, um so kleiner wird der Druck werden, ebenso wie der Partialdruck von Benzoldampf, welcher mit Ätherdampf gemischt wird.

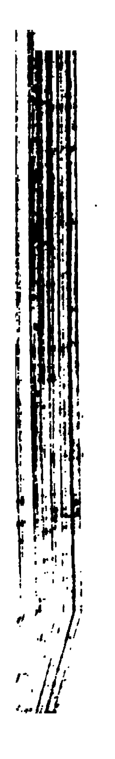
Nun ist nach S. 1508 das Volumen von 1 Mol eines beliebigen Gases im Normalzustande = 22,4 Litern, oder sein Druck, wenn es auf 1 Liter komprimiert wird, 22,4 Atm. Ist somit das Benzol mit Äther derart gemischt, daß sich im Liter 1 Mol C_6H_6 (= 78 g) befindet, so ist der osmotische Druck 22,4 Atm. Wird der Kolben soweit heruntergeschoben, daß die Konzentration die doppelte wird, so steigt der Druck ebenso wie im Falle des Benzoldampfes auf das Doppelte. Dasselbe ist der Fall, wenn etwa die absolute Temperatur verdoppelt wird; denn die Betrachtungen der kinetischen Gastheorie, aus welchen dies abgeleitet wurde, lassen sich auf den osmotischen Druck ohne weiteres übertragen. Es gilt also auch für diesen das Boyle-Gay-Lussacsche Gesetz, und zwar bezogen auf 1 Mol:

$$\frac{p \cdot v}{\tau} = \frac{22{,}4 \cdot 1}{273} = 0{,}0821 \text{ Liter-Atmosphären pro Grad.}$$

Befinden sich in einem Liter einer beliebigen Lösung c Gramm gelöster Substanz und ist der von dieser auf eine für sie (aber nicht für das Lösungsmittel) undurchdringliche Membran ausgeübte osmotische Druck p Atmosphären bei t^0 C, so ist das Molekulargewicht dieser gelösten Substanz

$$m = 22{,}42\,(1 + 0{,}003\,67\,t)\,\frac{c}{p}\cdot$$

Lösungen verschiedener Stoffe in demselben Lösungsmittel, welche gleich viel Grammoleküle enthalten, haben auch den gleichen osmotischen Druck, sind isosmotisch, umgekehrt sind solche Lösungen mit gleicher osmotischer Wirkung (z. B. auf Pflanzenzellen — Plasmolyse — oder auf künstliche Zellen, wie durch Schlierenbildung erkannt werden kann) von gleicher Mol-Konzentration, so



daß, wenn das Molekulargewicht der einen Substanz bekannt ist, das der anderen gefunden werden kann.

In Ermangelung geeigneter halbdurchlässiger Membranen ist die direkte Bestimmung des osmotischen Druckes meist unmöglich. Sie kann aber indirekt geschehen, z. B. durch Messung der Dampftensionserniedrigung (S. 1542).

Ist s das spezifische Gewicht der Lösung, so beträgt der osmotische Druck:

$$P = \frac{s \cdot h}{76 \cdot 13{,}5} \text{ Atmosphären,}$$

somit wird die Dampfdruckerniedrigung durch Auflösung des Zuckers im Wasser $p'' = p - p'$:

$$p'' = \frac{18 \cdot p \cdot P}{82{,}1 \cdot \tau \cdot s}.$$

Der osmotische Druck ist:

$$P = \frac{p - p'}{p} \cdot \frac{82{,}1 \cdot \tau \cdot s}{18} \text{ Atmosphären.}$$

Setzt man statt p das wenig verschiedene p', statt des Molekulargewichtes des Wassers 18 das Molekulargewicht M irgend eines anderen Lösungsmittels, so wird

$$P = \frac{p - p'}{p'} \cdot \frac{82{,}1 \cdot \tau \cdot s}{M} \text{ Atmosphären.}$$

Nach obigem ist der osmotische Druck, wenn im Liter c Gramm einer Substanz vom Molekulargewicht m gelöst sind:

$$P = \frac{0{,}0821 \cdot \tau \cdot c}{m} \text{ Atmosphären,}$$

somit ist:

$$m = \frac{0{,}0821 \cdot \tau \cdot c \cdot p' \cdot M}{(p - p') \cdot 82{,}1 \cdot \tau \cdot s}.$$

Nun wiegt 1 Liter Lösung $s \cdot 1000$ g, darin sind c Gramm Substanz, also entfallen auf 100 g Lösung $Q = c \cdot 100/s \cdot 1000 = c/s \cdot 10$. Demnach ist:

$$m = M \frac{Q \cdot p'}{100\,(p - p')}.$$

Zur Messung der Depression kann man ein Barometer benutzen, in welches man ein kleines Fläschchen mit Glasstöpsel, welches durch Eintauchen in die zu untersuchende Flüssigkeit gefüllt worden war, aufsteigen läßt, neben einem zweiten, in welches man das Lösungsmittel allein einbringt. Beispielsweise wurde gefunden: Die Dampftension von Äther = 380 mm, diejenige einer 10 prozentigen Lösung von Naphtalin in Äther 362 mm. Demnach ist das Molekulargewicht des Naphtalins m, da dasjenige des Äthers $M = 62$ ist:

$$m = 62 \frac{10 \cdot 380}{100 \cdot 18} = 130 \text{ (statt 128).}$$

Gewichtsmengen, welche im Verhältnis der Molekulargewichte stehen, erzeugen gleiche Depressionen der Dampftension (Gesetz von Raoult).

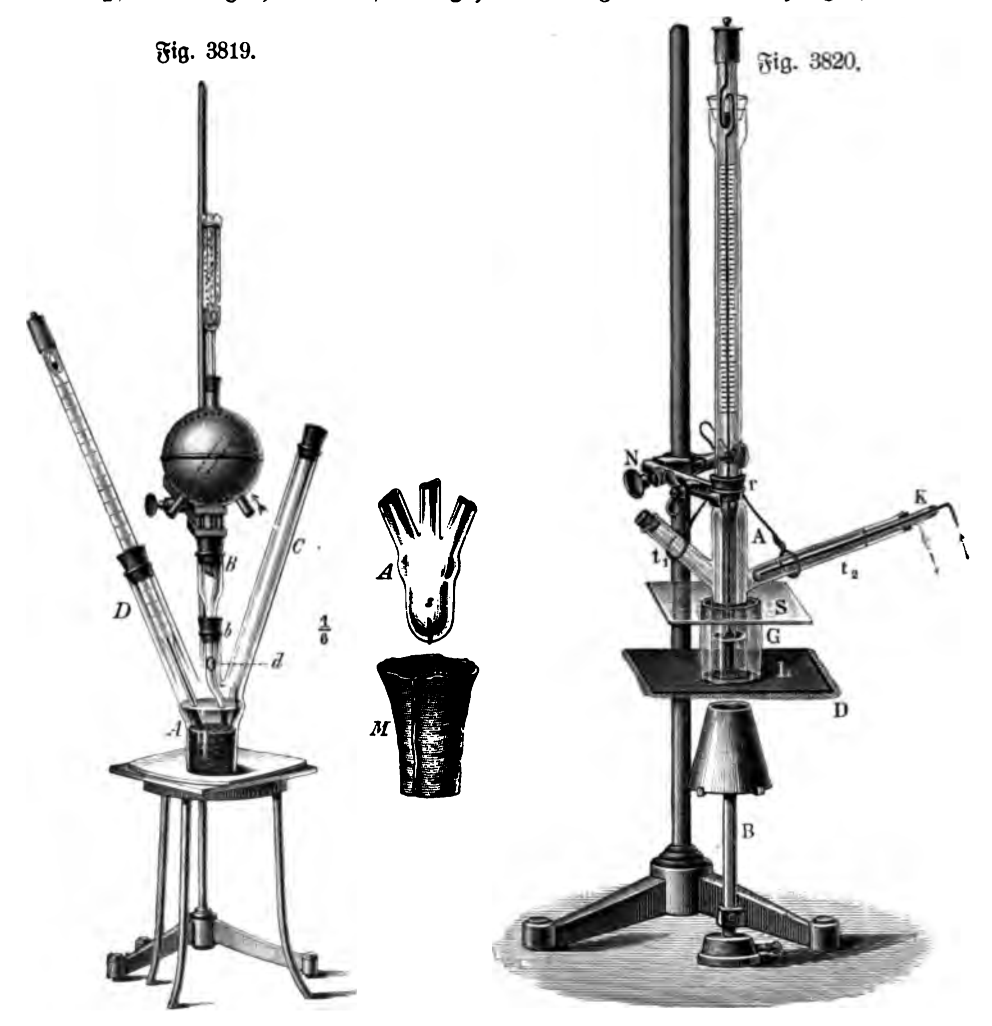
Solche isosmotische Lösungen, d. h. Lösungen von gleichem osmotischen Druck, sind also auch isotonisch, d. h. haben gleiche Dampftension. Die Erniedrigung der Tension bei Zusatz von 1 Mol zu 100 Mol Lösungsmittel beträgt für alle Lösungen etwa 1 Proz. der ganzen Dampftension. Beträgt sie also bei

Lösung eines Stoffes mit unbekanntem Molekulargewicht etwa 3 Proz., so folgt, daß die gelöste Menge in Grammen das dreifache des Molekulargewichtes ist.

Auch die Dampftension läßt sich im allgemeinen nur schwierig genau messen, man kann aber umgekehrt die den Dampftensionserniedrigungen proportionalen Siedepunktserhöhungen bestimmen. Die Gleichung (S. 1544) $\lambda = R.\tau^2 . dlnp/d\tau$ ermöglicht die Umformung[1]), deren Ergebnis eine Gleichung ist von der

Fig. 3819.

Fig. 3820.



Form $m = E.Q/t$, worin Q die frühere Bedeutung hat und t die beobachtete Siedepunktserhöhung darstellt. E heißt die „molekulare Siedepunktserhöhung". Sie berechnet sich aus $E = 0{,}02\,\tau^2/l$, wenn l die Verdampfungswärme von 1 g des Lösungsmittels und τ der Siedepunkt nach absoluter Skala. Beispielsweise ist für Wasser $E = 5{,}2$, also $m = 5{,}2\,Q\,t$. Für eine Lösung mit 33 Proz. Zucker wurde beobachtet $t = 0{,}5$, somit ist $m = 5{,}2 . 33/0{,}5 = 340$, was in der Tat der Formel $C_{12}H_{22}O_{11}$ entspricht.

Würden x Gramm einer Substanz, zu 100 g Wasser hinzugefügt, den Siede-

[1]) Siehe Nernst, Theoret. Chemie, 4. Aufl., S. 142 und 265.

punkt um 10,4° = 2 × 5,2° erhöhen, so wäre zu schließen, daß x das doppelte Molekulargewicht ist, somit das Molekulargewicht der Substanz selbst $\frac{x}{2}$ beträgt.

Für Alkohol ist die „molekulare Siedepunktserhöhung“ 11,5°, für Äther 21,2°, für Benzol 26,7°, für Chloroform 36,6°.

Bei dem Apparat zur Ausführung von Molekulargewichtsbestimmungen nach Beckmann[1]) (Fig. 3820) werden zur Verhinderung von Siedeverzügen etwa 10 g Platintetraeder in das Siedegefäß gelegt. Das Siedegefäß ist von einem Ringmantel umgeben, in welchem reines Lösungsmittel unter Anwendung eines Rückflußkühlers im Sieden erhalten wird. Zuerst werden 10 bis 20 g reines Lösungsmittel eingebracht, der Siedepunkt bestimmt, sodann durch die Seitenöffnung eine abgewogene Menge der zu untersuchenden Substanz eingebracht.

Daß sich der osmotische Druck durch Dampftensionsbestimmungen ermitteln läßt, hängt damit zusammen, daß die Arbeit zur Trennung des gelösten Stoffes vom Lösungsmittel durch Einpressen eines halbdurchlässigen Kolbens durch den osmotischen Druck bestimmt wird und dieselbe Arbeit auch beim Abdampfen des Lösungsmittels geleistet werden muß.

Gleiches gilt für das Ausfrieren des Lösungsmittels, falls dieses nicht mit dem gelösten Stoff Mischkristalle bildet.

Für die Verdampfungswärme wurde oben, S. 1544, gefunden:

$$\lambda = R.\tau^2 \frac{dlnp}{d\tau}.$$

Gleiches gilt für die Sublimationswärme:

$$\sigma = R.\tau^2 \frac{dlnp'}{d\tau},$$

wenn p' den Dampfdruck der erstarrten, p den der flüssigen Substanz bedeuten. Beim Gefrierpunkt müssen diese beiden Drucke gleich sein, denn wäre z. B. der des Eises und einer wässerigen Lösung verschieden, so würde eine fortwährende Destillation von der Seite des höheren Dampfdruckes nach der anderen stattfinden, es könnte kein Gleichgewicht bestehen. Durch Gleichsetzung der beiden Drucke ergibt sich nun nach einigen Umformungen[2]):

$$P = \frac{1000.S.w}{24,25} \cdot \frac{t}{\tau} \text{ Atmosphären}$$

als Größe des osmotischen Druckes, wobei bedeuten w die in Gramm-Kalorien ausgedrückte Schmelzwärme von 1 g Lösungsmittel, τ seine Erstarrungstemperatur, S sein spezifisches Gewicht und t die Gefrierpunktserniedrigung.

Sind Q Gramm Substanz in 100 g Lösungsmittel gelöst, so wird $t = E.Q\,m$, wenn m das Molekulargewicht der gelösten Substanz und $E = R.\tau^2/100.w$ die „molekulare Gefrierpunktserniedrigung“, $R = 1,991$.

Beispielsweise bringt ein Grammolekül, d. h. so viel Gramme, als das Molekulargewicht beträgt, zu 100 g Wasser hinzugefügt, eine Erniedrigung des Erstarrungspunktes um 18,4° hervor. Für Essigsäure beträgt diese „molekulare Gefrierpunkts-

[1]) Apparate zur Bestimmung des Molekulargewichtes durch Siedepunktserhöhung nach Beckmann sind zu beziehen in der älteren Form Fig. 3819 von Leybolds Nachf., Köln, nach Fig. 3820 von Hugershoff, Leipzig, das Thermometer zu 30 Mk., die übrigen Teile zu 18 Mk. — [2]) Siehe Nernst, Theoret. Chemie, 4. Aufl., S. 145 und 153.

depression“ 39°, für Phenol 74°, für Äthylenbromid 118°, für Benzol 49°, für Thymol 83°, für Nitrobenzol 70,7°, für Azobenzol 82° u. s. w.

Würde ein Zusatz von x Grammen einer Substanz zu 100 g Wasser den Gefrierpunkt um $38^0 = 2 \times 19^0$ erniedrigen, so wäre zu schließen, daß die Zahl x das Doppelte des Molekulargewichtes beträgt, somit das Molekulargewicht selbst $\frac{x}{2}$ ist.

Fig. 3821.



Bei Auflösung von 5 g Naphtalin in 100 g Benzol ergab sich eine Gefrierpunktserniedrigung von 2°, somit ist das Molekulargewicht des Naphtalins

$$m = E . Q/t = 49 . 5/2 = 122.$$

Fig. 3822.



Zur Ausführung des Versuches benutzt man den Beckmannschen Apparat. Gewöhnlich wird mit Eis und Kochsalz gekühlt, doch kann auch Ätherkühlung verwendet werden. Man gibt zunächst etwa 20 g Lösungsmittel ein und beobachtet den Gefrierpunkt unter Umrühren, wobei zunächst eine geringe Unterkühlung eintritt, die aber beim Ausscheiden der Kristalle wieder verschwindet. Alsdann setzt man eine abgewogene Menge Substanz zu, so daß eine Gefrierpunktserniedrigung von einigen Zehntel-Graden entsteht.

Dem Gefrieren analog ist das Auskristallisieren aus einer Lösung. In der Tat kann man auch diese Erscheinung in gleicher Weise zur Molekulargewichtsbestimmung bezw. zur Ermittelung des osmotischen Druckes verwerten. Ist z. B.

die Löslichkeit von reinem Äther in Wasser bei τ^0 L, die der ätherischen Lösung einer Substanz vom Molekulargewicht n L', so ist der osmotische Druck:

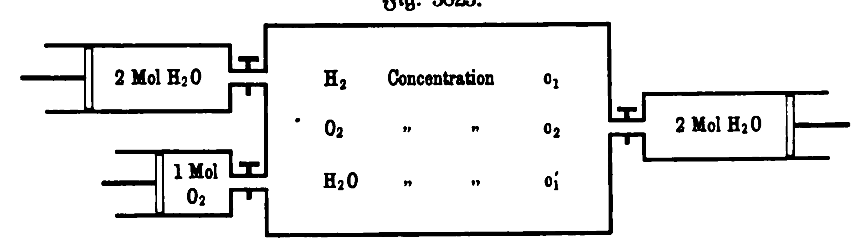
$$P = \frac{L - L'}{L'} \frac{0{,}0819 . \tau . 1000 . S}{M} \text{ Atmosphären,}$$

wenn S und M spezifisches Gewicht und Molekulargewicht des Äthers bedeuten. Die relative Löslichkeitserniedrigung ist $(L - L')/L' = n/N$, d. h. gleich der Anzahl der Moleküle des gelösten Stoffes dividiert durch die Anzahl der Moleküle des Lösungsmittels [1]) und $m = M . Q/100 . L'/(L - L')$.

Zur Ausführung des Versuches kann der Beckmannsche Gefrierapparat [2]) dienen, welcher mit 20 ccm Äther und 5 ccm Wasser beschickt wird. Der Gefrierpunkt liegt dann bei — 3,85° und steigt bei Auflösung einer dritten Substanz entsprechend der Erniedrigung der Löslichkeit des Äthers, wodurch diese gefunden werden kann.

750. Gesetz der Massenwirkung (Reaktionsisotherme). Denkt man sich schließlich als arbeitende Substanz einer thermodynamischen Maschine ein Gemisch mehrerer Stoffe, welche aufeinander reagieren und sich im chemischen Gleichgewicht befinden, so führt der zweite Hauptsatz zur Bedingung dieses Gleichgewichtes, dem von Guldberg und Waage gefundenen Gesetz der chemischen Massenwirkung.

Fig. 3823.



In einem großen Behälter (Fig. 3823) sei feuchtes Knallgas enthalten, und zwar sei die Mischung der drei Komponenten H_2, O_2 und H_2O eine derartige, daß sie gerade im Gleichgewicht sind, d. h., daß sich die Zusammensetzung des Gemenges mit der Zeit nicht ändert, insofern bei der betreffenden Temperatur die Reaktion $2H_2 + O_2 \rightleftarrows 2H_2O$, wie die statt des Gleichheitszeichens gesetzten Pfeile andeuten, sich mit gleicher Geschwindigkeit vorwärts und rückwärts vollzieht. Die Konzentrationen, d. h. die Anzahl Grammoleküle (Mol) pro Liter seien für die drei Stoffe bezw. c_1, c_2 und c_1'. Links seien zwei Pumpen angesetzt, von welchen die eine 2 Mol H_2 in 2 Litern enthält, die andere 1 Mol O_2 in 1 Liter. Rechts sei ebenfalls eine Pumpe angesetzt, die aber zunächst leer ist. Entleeren nun die beiden Pumpen links ihren Inhalt in den Behälter und werden gleichzeitig mit der Pumpe rechts 2 Mol H_2O in 2 Litern herausgezogen, so ändert sich in dem Behälter nichts, es war aber zu dem Prozeß Arbeit erforderlich. Ist der auf die Pumpenkolben von außen wirkende Druck der Atmosphäre $= P$ Kilogramm pro Quadrat-

[1]) Nernst, Zeitschr. physik. Chem. 6, 19, 573, 1890. — [2]) Beckmanns Apparat zur Bestimmung des Molekulargewichtes durch Gefrierpunktserniedrigung ist zu beziehen in der einfachen Form Fig. 3821 von Ernecke, Berlin, in der neueren Form Fig. 3822 von Hugershoff. Siehe auch Beckmann, Zeitschr. phys. Chem. 44, 161, 1903. Thermometer mit Hilfsteilung unter dem cylindrischen Reservoir zum bequemen und sicheren Einstellen auf ein beliebiges Temperaturintervall in der in ein Hundertstel geteilten Skala liefern Dr. Siebert u. Kühn, Kassel.

meter, der Druck im Behälter p Kilogramm pro Quadratmeter, das Gasvolumen außen V Cubikmeter, nachdem es in den Behälter hineingeschoben worden ist v, so hat die Atmosphäre beim Hineinschieben von 1 Mol die Arbeit PV Kilogrammeter geleistet, das Gas bei der Ausdehnung von V auf v die Arbeit $R\tau \log nat\, v/V$ (vgl. S. 1519) und, um es in den Behälter hineinzuschieben, waren $p \cdot v$ Kilogrammeter erforderlich. Die ganze Arbeit beträgt somit $PV + R\tau \ln v/V - pv$ oder, da $PV = pv$, $R\tau \ln v/V = R\tau \ln 1/c$. Für 2 Mol ist die Arbeit das Doppelte. Auf der linken Seite des Behälters wird also die Arbeit gewonnen: $2 R\tau \ln 1/c_1 + R\tau \ln 1/c_2$, auf der rechten Seite verloren: $2 R\tau \ln 1/c'$. Die gesamte gewonnene Arbeit ist demnach:

$$A = R\tau \ln \frac{c_1'^2}{c_1^2 \cdot c_2} \text{ Kilogrammeter.}$$

Da in dem Behälter keinerlei Änderung eintritt, kann sie nicht von c_1, c_2 und c' abhängig sein, d. h. $c_1'^2/c_1^2 \cdot c_2$ muß konstant sein. Wären statt 2 Wasserstoffmolekülen 3, 4 ... n an der Reaktion beteiligt gewesen, so würde an Stelle von c_1^2 entsprechend c_1^3, $c_1^4 \ldots c_1^n$ treten. Allgemein ist:

$$\frac{c_1'^{n_1'} \cdot c_2'^{n_2'} \ldots}{c_1^{n_1} \cdot c_2^{n_2} \ldots} = K.$$

Dies ist das Gesetz der Massenwirkung. Die Konstante K heißt der „Gleichgewichtskoeffizient". Unter Benutzung desselben wird die Arbeit

$$A = R\tau \cdot \ln K \text{ Kilogrammeter.}$$

Auch durch Betrachtungen auf Grund der kinetischen Theorie gelangt man zu dem Massenwirkungsgesetz.

Damit die Moleküle $2\,H_2$ und O_2 in dem gegebenen Beispiel aufeinander einwirken können, ist nötig, daß sie in einem Punkt zusammentreffen. Die Reaktion wird also um so rascher verlaufen, je größer die Konzentrationen der einzelnen Stoffe. Verläuft nun die Reaktion im direkten Sinne mit der Geschwindigkeit $v = k \cdot c_1 \cdot c_2 \ldots$, im umgekehrten mit der Geschwindigkeit $v' = k' \cdot c_1' \cdot c_2' \ldots$, so ist die tatsächliche Reaktionsgeschwindigkeit

$$V = v - v' = k \cdot c_1 \cdot c_2 \ldots - k' \cdot c_1' \cdot c_2' \ldots$$

und Gleichgewicht findet statt, wenn $V = 0$, d. h.

$$k \cdot c_1 \cdot c_2 \ldots = k' \cdot c_1' \cdot c_2' \ldots$$

oder, falls je n Moleküle beteiligt sind, wenn

$$\frac{c_1'^{n_1'} \cdot c_2'^{n_2'} \ldots}{c_1^{n_1} \cdot c_2^{n_2} \ldots} = \frac{k}{k'} = K.$$

Die Gleichgewichtskonstante ist also das Verhältnis der Geschwindigkeitskoeffizienten k und k'. Die räumlichen Konzentrationen c, d. h. die Anzahl Grammoleküle der einzelnen Stoffe im Liter, heißen auch die aktiven Massen der reagierenden Komponenten.

Für die Dissoziation eines Gases wie Stickoxyd ist $k = p'^2/p$, in diesem Falle Dissoziationskonstante genannt, wenn p der Partialdruck des Stickoxyds, p' der des Dissoziationsproduktes.

Andere Beispiele der Anwendung des Massenwirkungsgesetzes sind die als Esterbildung bezeichnete chemische Reaktion, Dissoziation in Lösungen (S. 1175), Dissoziation fester Stoffe (S. 1155), Löslichkeit fester Stoffe, gegenseitige Lösung von Flüssigkeiten u. s. w.



751. Chemische Kinetik (Reaktionsisochore). Auf Grund der beiden Hauptsätze und der obigen Betrachtungen läßt sich ermitteln, in welcher Weise das chemische Gleichgewicht sich verschieben muß bei Änderungen des Druckes und der Temperatur. Es folgt, daß, falls K die Gleichgewichtskonstante, d. h. das Produkt der aktiven Menge der entstehenden Stoffe dividiert durch das der verschwindenden, und q die verbrauchte Wärmemenge bezeichnet, die Gleichung gilt:

$$\frac{d\ln K}{d\tau} = \frac{q}{2\tau^2}.$$

Durch steigende Temperatur werden also diejenigen Vorgänge begünstigt, welche Abkühlung hervorbringen, z. B. die Bildung endothermer Stoffe, umgekehrt bei Abkühlung die der exothermen. (S. a. Phasenlehre, S. 1158 u. 1160.)

Aus der oben (S. 1152) abgeleiteten Gleichung $A = R\tau\ln K$ ergibt sich

$$\frac{dA}{d\tau} = R\ln K + R\tau\,\frac{d\ln K}{d\tau}.$$

Nun ist nach dem zweiten Hauptsatz $dA = Q.d\tau/\tau$ und nach dem ersten $Q = q + A$, wenn q die innere Arbeit (innere latente Wärme, Wärmetönung), A die äußere Arbeit (äußere latente Wärme), Q die aufgenommene Wärmemenge bezeichnen. Also:

$$\tau\cdot\frac{dA}{d\tau} = q + A,$$

$$R\tau\ln K + R\tau^2\,\frac{d\ln K}{d\tau} = q + R\tau\ln K$$

und

$$q = R\tau^2\,\frac{d\ln K}{d\tau}.$$

Dies ist die Gleichung der Reaktionsisochore [1]).

Da $R = 1{,}991$ Kal. pro Grad, also nahezu 2, kann man auch schreiben

$$q = 2\tau^2\,\frac{d\ln K}{d\tau},$$

woraus sich die obige Form der von van 't Hoff gefundenen Gleichung der Reaktionsisochore ergibt.

Von besonderem Interesse ist die Ähnlichkeit derselben mit der von Clausius aufgestellten Gleichung der Dampftensionskurve (S. 1544)

$$\lambda = 2\tau^2\,\frac{d\ln p}{d\tau}.$$

Wie man sieht, besteht der Unterschied nur darin, daß an Stelle der Dampftension p in dieser Gleichung die Gleichgewichts- oder Dissoziationskonstante gesetzt ist, welche übrigens, wie oben (S. 1552) z. B. bei Stickoxyd gezeigt, ebenfalls in inniger Beziehung zum Druck des Gases steht.

Anwendung findet die Gleichung auf zahlreiche Erscheinungen, wie die Dissoziation und Auflösung fester Körper, Einfluß von Druck und Temperatur auf das chemische Gleichgewicht, explosive Vorgänge u. s. w.

In hohen Temperaturen verschiebt sich die Gleichgewichtskonstante K (d. h. das Produkt der aktiven Mengen der dabei entstehenden Stoffe dividiert durch das Produkt der aktiven Mengen der dabei verschwindenden Stoffe) zu Gunsten

[1]) Siehe Nernst, Theoret. Chemie, 4. Aufl., S. 634.

der Beständigkeit der wärmeaufnehmenden (endothermen) Systeme wie Ozon, Acetylen, Cyan u. s. w. Diese bilden sich also in hohen Temperaturen und werden bei niedrigen Temperaturen labil (Explodierbarkeit des flüssigen Ozons). Umgekehrt werden Reaktionen, die bei Zimmertemperatur noch lebhaft verlaufen, bei niedriger Temperatur äußerst langsam, z. B. Natrium und Salzsäure. Knallgas ist eine instabile Mischung, die Reaktionsgeschwindigkeit aber äußerst klein. Bei hoher Temperatur wächst diese bis zur Explosion, schließlich tritt aber Überwiegen der umgekehrten Reaktion, d. h. Dissoziation ein. Deshalb besitzt die Knallgasflamme nicht die theoretische Temperatur 7850°, sondern nur 2700°[1].

752. **Lösungstension und Elastizität.** Da der Prozeß der Auflösung eines Kristalls ganz dem der Verdampfung analog ist, ein verdampfender Tropfen aber an stärker gekrümmten Stellen seiner Oberfläche größere Dampftension besitzt, folgt, daß auch z. B. ein ellipsoidischer fließender Kristall (§ 194, S. 867 u. Fig. 2500) an den stark gekrümmten Stellen seiner Oberfläche größere Lösungstension besitzt. Er könnte somit dauernd die Ellipsoidform nicht behalten, wenn nicht die Elastizität diesen Überschuß der Lösungstension kompensieren würde. Auf diesem Wege gelangt man also zu Beziehungen zwischen osmotischem Druck und Elastizität, da ersterer im Falle des Gleichgewichtes mit der Lösungstension übereinstimmt. Der Kristall löst sich auf, wenn seine Lösungstension überwiegt, er wächst, wenn sie kleiner ist.

753. **Die Atome und der zweite Hauptsatz.** Da es halb durchlässige Scheidewände gibt, welche die Moleküle eines Gases oder einer Flüssigkeit durchlassen, diejenigen einer anderen nicht, könnte man vermuten, daß auch solche Scheidewände herstellbar wären, welche rasch bewegte Atome eines Gases durchlassen, während langsam sich bewegende nicht hindurchzubringen vermögen. Da nach der kinetischen Gastheorie die rasch sich bewegenden Atome, welche sich außerhalb der Membran ansammeln, heißes Gas repräsentieren, während die zurückgebliebenen, langsam sich bewegenden eine kältere Gasmasse bilden, so wäre es möglich, mit einer solchen Membran ein Temperaturgefälle zu erzeugen, welches weiterhin zum Betriebe einer thermodynamischen Maschine ausgenutzt werden könnte. Man hätte eine Art Perpetuum mobile, welches nach dem zweiten Hauptsatz unmöglich sein soll. Man kann hieraus schließen, daß entweder die kinetische Gastheorie oder der zweite Hauptsatz unzutreffend ist, oder daß es unmöglich ist, Scheidewände von der erforderlichen Art herzustellen (Vgl. S. 1538).

754. **Entropie.** Anfänglich wurde gesagt, ein Perpetuum mobile sei deshalb unmöglich, weil dem ersten Hauptsatze zufolge Energie nicht aus nichts entstehen könne. An Energie fehlt es aber in der Natur keineswegs, die Luft, das Wasser, die Erde enthalten ungeheure Mengen von Wärmeenergie, die unendlich groß sind gegenüber denjenigen, welche wir in Form mechanischer Arbeit von einem praktisch brauchbaren Perpetuum mobile verlangen. Dennoch ist ein solches unausführbar, selbst in den allerbescheidensten Dimensionen. Jene ungeheuren Energievorräte

[1] Siehe auch: van 't Hoff, Vorlesungen über theoretische und physikalische Chemie, Braunschweig 1901; Ostwald, Lehrbuch der allgemeinen Chemie II, Leipzig 1893 bis 1902; Bakhuis-Roozeboom, Die heterogenen Gleichgewichte, Braunschweig 1901; Weinstein, Thermodynamik und Kinetik der Körper, Braunschweig 1901; Planck, Vorlesungen über Thermodynamik, Leipzig 1897.

haben praktisch nicht den geringsten Wert. Diese Betrachtungen führen zu dem Begriff des Wertes der Energie, der einigermaßen dem entspricht, was man im gewöhnlichen Leben Geldwert nennt.

Wenn wir beispielsweise in einem Druckluftkessel mittels einer Bierpressionsluftpumpe, die irgend ein Arbeiter betreiben möge, Luft hineinpressen, so haben wir in gewissem Sinne Energie aufgespeichert; wir können die Druckluft verwerten, um mechanische Arbeit zu leisten, z. B. Bier vom Keller bis zum Schanktisch zu heben. Verbinden wir nun den gefüllten Kessel mit einem anderen evakuierten Kessel, der sehr viel größer sein möge, so daß der Druck fast auf gewöhnlichen Atmosphärendruck sinkt, so ändert sich dadurch, wie wir wissen (s. S. 1518), der Energieinhalt des Gases nicht. Dieses wird sich allerdings beim Ausströmen infolge der Expansion, d. h. infolge der Erzeugung von Bewegungsenergie vorübergehend abkühlen, sobald es aber zur Ruhe gekommen, hat es wieder die anfängliche Temperatur, die Bewegungsenergie der Moleküle ist unverändert geblieben.

Nichtsdestoweniger ist eine große Veränderung eingetreten hinsichtlich des Wertes der Energie. Solange die Luft noch komprimiert war, hatte ihre Arbeitsfähigkeit einen Wert, der etwa dargestellt wird durch den Lohn des Arbeiters, der sie verdichtete, insofern sie ja vermöge ihrer Energie einen solchen Arbeiter hinsichtlich der Arbeitsleistung zu ersetzen vermag; nach der Expansion aber kann sie dies unter den durch das Vorhandensein des Luftdrucks bedingten Verhältnissen (wohl im absoluten Vakuum) nicht mehr, obschon die Energie dieselbe ist wie zuvor, ihre Energie ist entwertet oder zerstreut (Dissipation der Energie).

Die Größe, welche den Wert einer gegebenen Menge von Wärmeenergie darstellt, ist die sogenannte freie Energie, d. h. diejenige Menge derselben, welche unter den gegebenen Umständen mittels einer Carnotschen Maschine (s. S. 1536) in Arbeit umgewandelt werden könnte.

Sei z. B. eine glühende eiserne Platte gegeben, so wäre ihre freie Energie die Wärmemenge, die sich, wie S. 1167 gezeigt, mittels des Kalorimeters bestimmen läßt, multipliziert mit der Temperaturdifferenz gegen die Umgebung, dividiert durch ihre Temperatur nach absoluter Skala. Würde man diese Wärme benutzen, eine Carnotsche Maschine zu treiben, welche zwischen dieser heißen Platte und einer kalten arbeitet und an letztere Wärme abgibt, so würde hierdurch die freie Energie nicht geändert werden, falls die Carnotsche Maschine eine vollkommen umkehrbare ist, d. h. unter den gleichen Umständen auch umgekehrt betrieben werden kann, wobei alle Änderungen wieder rückgängig werden. Notwendig würde dabei schließlich die freie Energie denselben Wert erhalten wie zu Anfang, da die zuerst erzeugte Arbeit, welche etwa als potentielle Arbeit eines Gewichtes aufgespeichert sein könnte, gerade ausreicht, die Maschine umgekehrt zu treiben und die auf die kalte Platte übergegangene Wärme wieder auf die heiße zurückzubringen. Diese Erhaltung der freien Energie in solchem Falle findet in anderer Form Ausdruck in dem Satz, daß das Wärmegewicht unverändert bleibt (S. 1536).

Anders verhält es sich, falls die Übertragung der Wärme auf andere Weise bewirkt wird, z. B. durch direkten Wärmeübergang von der heißen auf die kalte Platte. Hier findet eine Verminderung der freien Energie statt, eine Entwertung oder Zerstreuung der Energie, die am einfachsten darin ihren Ausdruck findet, daß das Wärmegewicht wächst. Durch den Wärmeübergang ist nämlich die Temperatur niedriger geworden, die Wärmemenge selbst aber ist sich gleich ge-

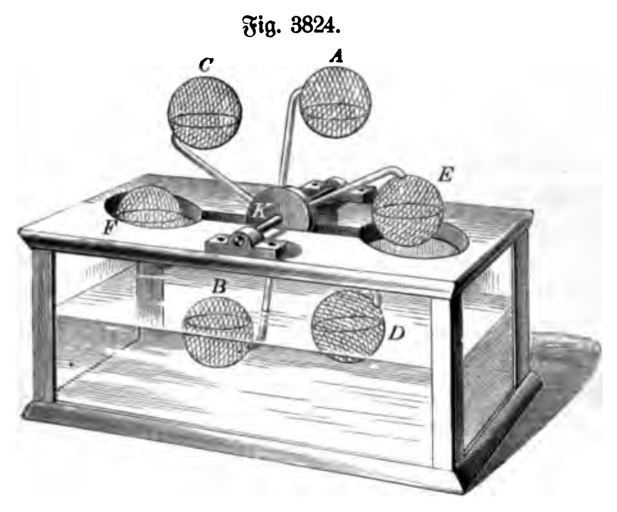
blieben, somit muß der Quotient derselben und der absoluten Temperatur größer geworden sein.

Unter den mannigfachen Vorgängen, die sich in der Natur abspielen [1]), befinden sich nun manche, bei denen wie beim Betrieb der Carnotschen Maschine die freie Energie oder das Wärmegewicht erhalten bleibt, andere, bei denen erstere wächst, letzteres zunimmt; sicher aber keiner, bei dem das Entgegengesetzte der Fall ist, denn dies wäre ein Widerspruch gegen den zweiten Hauptsatz. Man kann demselben geradezu die von Clausius ausgesprochene Form geben: **Das Wärmegewicht oder die Entropie der ganzen Welt strebt einem Maximum zu.**

Wärmegewicht und Entropie sind übrigens nicht genau gleichbedeutend, obschon das Wesen des Begriffs das gleiche ist.

Das Beispiel der Windbüchse (S. 1513) oder des Druckluftkessels (S. 984) zeigt, daß freie Energie auch ohne Temperaturgefälle vorhanden sein kann, falls nämlich eine Druckdifferenz vorhanden ist. Ebenso kann eine chemische Differenz das Vorhandensein freier Energie bedingen, wie z. B. beim Betrieb von Honigmanns Natronlokomotive (§ 487, S. 1204) oder bei der chemischen Drehscheibe [2]) von Longinescu.

Fig. 3824.



Einen interessanten hierher gehörigen Thermomotor hat z. B. Enrico Bernardi (Scientific American 1874, S. 150) konstruiert (Fig. 3824). Drei mit Äther teilweise gefüllte, auf entgegengesetzten Seiten mit Kugeln versehene, luftleer gemachte Glasröhren (Pulshämmer) sind, zu einem symmetrischen Stern vereinigt, in der Mitte einer horizontal drehbaren Achse befestigt. Diese ruht auf den Rändern eines mit Wasser gefüllten Gefäßes, so daß die unteren Kugeln in das Wasser eintauchen. Durch einen Gazeüberzug, der sich beim Durchgang durch das Wasser benetzt, wird die Oberfläche der Kugeln feucht gehalten. Da nun infolge der Verdunstungskälte die Dampfspannung in den oberen Kugeln geringer ist, kondensiert sich allmählich der Ätherdampf in den oberen Kugeln. Diese werden schwerer, die unteren entsprechend leichter und schließlich, wenn das Übergewicht groß genug geworden, kommt die Vorrichtung in anhaltende Drehung [3]).

[1]) Wärmeenergie der Sonne wird durch Vermittelung der Strahlung in dem Holz der Wälder aufgespeichert. Die Temperatur, die wir damit erzielen können, ist aber geringer als die Sonnentemperatur. Von der in Pflanzen aufgespeicherten Energie stammt ferner die Arbeitsfähigkeit der Tiere und des Menschen. — [2]) Eine vertikale Metallscheibe, die sich an einer Seite chemisch auflöst, so daß das Gleichgewicht gestört wird und Rotation erfolgt (Z. 8, 368, 1895). — [3]) Bei einem derartigen Motor, dessen Kugeln 19,8 mm Durchmesser hatten und deren Mittelpunkte um 78,7 mm voneinander entfernt waren, fanden 60 Umdrehungen in 24 Stunden statt und die Leistung betrug 0,017 kgm.

Um auch diese Fälle berücksichtigen zu können, ist von Clausius der etwas kompliziertere Begriff der Entropie eingeführt worden.

Einfacher kann man sagen, bei allen Energieumwandlungen, die in der Welt stattfinden, wird Arbeit immer vollständig in Wärme umgesetzt werden, während die Rückumwandlung immer nur teilweise möglich ist; die Menge der Wärme in der Welt muß also immer mehr zunehmen, während gleichzeitig ihre Temperatur (ihr Wert) niedriger wird, und alle mechanischen Energieformen müssen verschwinden, es muß schließlich völliger Stillstand des Weltgetriebes eintreten, wie bei einer abgelaufenen Uhr.

Ist dies richtig, so hat man weiter geschlossen, so kann die Welt nicht seit ewigen Zeiten bestehen, denn dann müßte jene Erstarrung heute schon eingetreten sein.

Besonders wegen solcher weitgehender Konsequenzen, die sich an den zweiten Hauptsatz anknüpfen, hat man die Gültigkeit desselben in Zweifel gezogen, doch bisher ohne Erfolg [1].

755. **Wärmeleitung.** Besteht die Wärme gemäß der mechanischen Wärmetheorie in einer Bewegung der Moleküle [2], so ist die Übertragung der Wärme von einem Körper auf den anderen eigentlich ein spezieller Fall des elastischen Stoßes und in der Tat bleibt dabei die Wärmemenge ebenso wie die Energiemenge beim elastischen Stoß unverändert. Es tritt aber, wie schon bemerkt, eine Zerstreuung der Energie ein, und man könnte die Erscheinung auch bezeichnen als Diffusion der molekularen Bewegung (bei Metallen richtiger der Elektronenbewegung) [3].

In der Tat verhält sich die Wärme wie eine Flüssigkeit, die einen porösen Körper durchströmt, d. h. es gilt auch hier das Ohmsche Gesetz: Der Wärmestrom (die pro Sekunde durch einen Querschnitt hindurchtretende Wärmemenge) ist gleich der Temperaturdifferenz, dividiert durch den thermischen Widerstand, und letzterer ist gleich einer Konstante (dem Reziproken des Wärmeleitungsvermögens mal der Dicke) der durchströmten Schicht, dividiert durch deren Querschnitt. Beispielsweise läßt eine Eisenplatte von 1 qm Fläche und 1 mm Dicke bei 1° Temperaturdifferenz beider Seiten pro Sekunde eine Wärmemenge von 15 (großen) Kalorien durch. Bei einer Dicke von 2 mm wäre die durchgelassene Wärmemenge nur halb so groß, bei einer Temperaturdifferenz von 10° dagegen das Zehnfache.

Ist die durchtretende Wärmemenge pro Sekunde J Kalorien, die Temperaturdifferenz E Grad, die Dicke der durchströmten Schicht l Meter, ihr Querschnitt q Meter und das Wärmeleitungsvermögen η, so ist

$$J = E/R \quad \text{und} \quad R = 1/\eta \, . \, l/q \quad \text{oder} \quad \eta = J \, . \, l/E \, . \, q.$$

[1] Vor allem läßt sich einwenden, daß außer mechanischer Energie und Wärme, wie später gezeigt wird, noch andere Energieformen in Betracht kommen; doch haben sich, wie hier voraus bemerkt werden mag, die beiden Hauptsätze auch auf diese ausdehnen lassen und sich stets als zutreffend erwiesen. Unklar geblieben ist bisher nur das Verhalten der radioaktiven Substanzen, welches scheinbar beiden Hauptsätzen widerspricht, insofern sie sich selbst erwärmen können, das indes bisher noch zu wenig untersucht wurde, um hieraus zuverlässige Schlüsse ziehen zu können. Vermutlich handelt es sich um endothermen Zerfall. Die Aufklärung dieser Schwierigkeiten muß der Zukunft überlassen bleiben. — [2] Es wäre hier auch an das Gesetz von Dulong u. Petit betreffend Atom- und Molekularwärmen zu erinnern und dessen Ausnahmen. — [3] Bei festen Körpern bleibt dabei die Wärme als solche vollständig erhalten, bei flüssigen und gasförmigen verwandelt sich ein Teil in sichtbare Bewegung infolge der auftretenden Dichtedifferenzen.

Gewöhnlich nennt man **Wärmeleitungsvermögen** die Anzahl Gramm-Kalorien, welche pro Sekunde durch 1 qcm hindurchgehen, wenn auf der Strecke 1 cm das Temperaturgefälle 1° C beträgt. Das größte Wärmeleitungsvermögen, und zwar rund 1 g/cal./cm^{-1}/Grad^{-1}, hat Silber.

Der Quotient Wärmeleitungsvermögen geteilt durch Dichte und spezifische Wärme heißt **Temperaturleitungskoeffizient**[1]).

Zur schematischen Demonstration der Bedeutung der Wärmeleitungskonstante verwende ich einen Apparat, bestehend aus zwei konaxialen Röhren, von welchen die innere von Dampf, die äußere von Wasser durchströmt wird. Zu bestimmen ist das Wärmeleitungsvermögen der inneren aus Eisen bestehenden Röhre. Die Länge beträgt 1,37 m, der innere Radius 0,023 m, der äußere 0,033 m, somit die innere Oberfläche 0,141 qm, die äußere 0,111 qm und im Mittel 0,126 qm. Die Wandstärke ist 0,0035 m, somit $R = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{0{,}0035}{0{,}126}$.

Die durch die äußere Röhre fließende Wassermenge beträgt 1 Liter in 15 Sekunden, die Eintrittstemperatur des Wassers 10°, die Austrittstemperatur 55°, somit die Temperaturerhöhung 45° und die Wärmemenge pro Sekunde 45/15 = 3 Kal. Das mittlere Temperaturgefälle ist 100 — (55 + 10)/2 = 68°, somit

$$R = E/J = 68/3$$

und

$$\eta = \frac{3 . 0{,}0035}{68 . 0{,}126} = 0{,}0014 \text{ Kalorien}$$

pro Quadratmeter und Sekunde bei 1° Temperaturdifferenz und 1 m Schichtdicke.

Beispiele einiger Wärmeleitvermögen in Grammkalorien/(cm/Grad sec) bei 18° sind:

Kupfer 0,93, Aluminium 0,48, Zink 0,26, Messing 0,15 bis 0,30, Eisen 0,14 bis 0,17, Nickel 0,14, Blei 0,08, Konstantan 0,054, Porzellan 0,03, Wismut 0,019, Glas 0,001 bis 0,002, Holz 0,0003.

Mittels der für Eisen geltenden Zahl könnte man z. B. die pro Sekunde in einen Dampfkessel eintretende Wärmemenge bestimmen, falls dessen Dicke bekannt ist, die Heizfläche und die Temperaturdifferenz zwischen Feuergasen und Kesselwasser. Es wäre so auch möglich, den **Wirkungsgrad des Dampfkessels** zu finden, d. h. das Verhältnis der durch die Kesselwand hindurchgehenden Wärmemenge zu der gesamten in der Feuerung erzeugten.

Die Verbrennungswärme der Kohle beträgt, wie S. 1212 gezeigt, 8000 Kal. Wären also zur Erzeugung von 1 kg Dampf 615 Kal. nötig, so würden, falls die ganze Wärme durch die Kesselwand hindurchströmen könnte und nichts durch Leitung nach außen, sowie mit dem Rauch durch den Schornstein verloren ginge, pro Kilogramm verbrannter Kohle 13 kg Dampf entstehen. Bilden sich nun tatsächlich nur 8 kg, wäre, wie man sagt, die **Verdampfung eine achtfache**, so wäre der Wirkungsgrad des Kessels $^8/_{13}$ = 0,62 = 62 Proz.

Für die **Wärmeströmung in plattenförmigen Körpern** gestalten sich die Stromlinien und Linien gleicher Temperatur (Isothermen) ebenso wie die Strom-

[1]) Man könnte definieren: Die **innere Wärmeleitung** beträgt 1 CGS, wenn bei der Temperaturdifferenz 1 CGS (= 2,4 . 10^{-6} Celsiusgrade) durch eine Wand von der Dicke 1 CGS (1 cm) durch den Querschnitt 1 CGS (1 qcm) pro CGS (d. h. pro Sekunde) die Wärmemenge 1 CGS (= 2,38 . 10^{-11} Kilogrammkalorien) hindurchgeht.

und Niveaulinien bei den analogen elektrischen Versuchen, so daß die gleichen Tafeln wie sie für jene Verwendung finden, auch hier gebraucht werden können.[1]).

Erhitzt man eine Kugel, in deren Mittelpunkt sich ein feines Thermometer befindet, so wird eine bestimmte Zeit verfließen, bis dieses Thermometer auf eine bestimmte Temperatur gestiegen ist. Hierauf beruht Böckmanns Wärmeleitungsapparat, bestehend aus der in Kugelform gebrachten Substanz und einer Vorrichtung zum gleichmäßigen Erwärmen derselben. Durch eine Bohrung der Kugel wird das Gefäß des Thermometers in den Mittelpunkt gebracht.

Ferner beruht hierauf die Bestimmung von Ofentemperaturen durch Wiborghs Thermophone. Es sind kleine cylindrische Tonkörper mit darin eingeschlossenem, kleinem, ungefährlichem Explosivkörper. Die Temperatur wird beurteilt nach der Zeit bis zum Auftreten des Knalls[2]).

Richarz demonstriert die Brechung der Wärmestromlinien und der Isothermen an einer aus Kupfer- und Bleiblech in einer geraden Naht zusammengelöteten Doppelplatte, welche auf der einen Seite mit einem Firnis bestrichen ist, in welchen pulverförmiges Quecksilberkupferjodid dick eingerührt war. Die Platte wird so aufgestellt, daß die Trennungslinie der beiden Metalle schräg verläuft und das untere Ende in ein Bad von heißem Leinöl eintaucht[3]).

Die außerordentlich geringe Wärmeleitungsfähigkeit von Wolle, Stroh, Federn u. s. w., die zum Teil dadurch bedingt ist, daß diese Körper porös sind, also dem Wärmestrom einen sehr geringen Querschnitt darbieten, findet mannigfache Anwendung, z. B. zum Schutz heißer Substanzen gegen Abkühlung (Wärmeschutzmasse bei Dampfleitungen, Kochkiste u. s. w., vgl. § 770, S. 1576), teils auch zum Schutz kalter Körper gegen Erwärmung (z. B. Erhaltung von Eishaufen durch Bedeckung mit Stroh, Aufbewahrung von Eis in der Kochkiste oder in wollenen Tüchern u. s. w.). Umgekehrt kann das gute Wärmeleitungsvermögen z. B. von Metallen dazu dienen, allzu starke Erhitzung zu hindern.

Wird eine Kupfer- oder Bleikugel mit Musselin fest umbunden, so kann man sie einige Zeit in eine Flamme halten, ohne daß das Musselin Feuer fängt, da das Metall die Wärme sehr rasch aufnimmt. Ebenso kann man einen messingenen Gasbrenner mit Musselin überbinden und dann das Gas anzünden, ohne daß das Gewebe verbrennt.

Wird ein mit Papier überklebter Holzcylinder in eine Flamme gehalten, so verkohlt das Papier rasch, bei Anwendung eines Eisencylinders dagegen nicht.

Looser (Z. 11, 283, 1898) empfiehlt zum Schmelzen von Metall in Papier folgendes Verfahren. Man fertigt aus gutem Zeichenpapier ein rechteckiges Kästchen, 8 cm lang, 5 cm breit, 1 cm hoch und gießt es voll Schnellot, welches nur wenig über den Schmelzpunkt erhitzt wurde und in welches man nach dem Schmelzen noch einige Stückchen Metall hinein geworfen hatte. Nach dem Erstarren setzt man das Kästchen auf einen kleinen Ring und stellt eine kleine Bunsenflamme darunter, bis das Metall geschmolzen ist. Alsdann ersetzt man die Flamme durch ein Becherglas mit Wasser, durchsticht den Boden des Kästchens mit einer Stricknadel und zeigt so, daß das Metall wirklich flüssig ist, insofern es in schlanken regelmäßigen spindelförmigen Tropfen in das Wasser heruntertropft und dort erstarrt.

[1]) Vgl. die betreffenden dem II. Bande beigegebenen Tafeln, s. a. Fig. 2467, S. 856, Fig. 2509, S. 869. — [2]) 50 Stück zu 13,50 Mk. liefert Muencke in Berlin. — [3]) Siehe Naturw. Rundsch. 17, 478, 1902.

756. Die Temperatur der Erde. Die Temperatur der Erde beträgt wahrscheinlich im Centrum 4000°. In der Nähe der Oberfläche nimmt die Temperatur pro Meter Tiefe um 0,036° C ($^1/_{40}$ bis $^1/_{25}$ Grad) zu. Hiernach läßt sich aus dem bekannten Wärmeleitungsvermögen der Temperaturfluß aus dem Innern berechnen. Derselbe ist sehr klein, so daß ohne die Sonnenstrahlung die Erdoberfläche völlig kalt wäre.

Von etwa 100 km an wird die Temperaturzunahme nach dem Innern, wie sich aus dem Wärmeleitungsgesetz ergibt, rasch kleiner, doch herrscht schon in einer Tiefe von etwa 160 km nahezu die Temperatur 4000°.

Die wechselnden Temperaturen der Jahreszeiten bewirken, daß das Temperaturgefälle nicht gleichmäßig ist, sondern im Sommer die Oberfläche heißer erscheint als die Tiefe. Erst in etwa 8 m Tiefe (in felsigem Gestein) tritt Umkehr des Temperaturgefälles ein. (Tiefe der Wasserleitungen etwa 2 m, Temperatur etwa 10°.)

757. Anisotrope Körper. Looser und Kolbe verwenden zur Demonstration der Verschiedenheit der Wärmeleitung in Holzplatten das Doppelthermoskop Fig. 3825. Zwei Rezeptoren R_1 und R_2 in Form abgestumpfter Kegel werden auf die Bank gesetzt, auf diese kommen zwei Holzplatten P_1 und P_2, 10 mm stark parallel und senkrecht zur Faser geschnitten, aus Kiefern-, Pappel- und Eichenholz. Auf diese kommen wiederum zwei Wärmequellen W_1 und W_2 für heißes Wasser oder Dampfheizung. In letzterem Falle sind die Holzplatten etwas vorragend in die Flaschen ohne Boden eingekittet. In deren Hälse werden zwei Gummipfropfen mit je zwei Glasröhren eingesetzt. Die gekrümmten Röhren werden durch zwei Gummischläuche g_1 und g_2 mit einer Glasgabel verbunden, an deren drittes Ende der Schlauch der Kochflasche befestigt wird. Die Gabel kann auf einen Schieber gesetzt werden.

Fig. 3825.

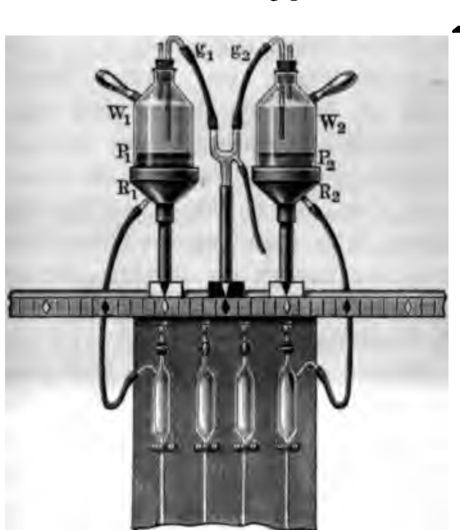


Fig. 3826.



Der Versuch läßt sich wiederholen mit Platten aus Gips, Alaun und Bergkristall, letzterer parallel und senkrecht zur Hauptachse.

Nebenstorff benutzt zu gleichem Zwecke zwei Holzkeile aus Lang- und Querholz mit Thermoskopfarbe (S. 1137) angestrichen und auf einem Blechschirm befestigt (Fig. 3826 Lb, 18), oder eine Holzpyramide, Fig. 3827 (K, 3), durch welche in der Richtung der Achse ein Messingrohr hindurchgeführt ist (Fig. 3827).

Ein sehr einfaches Verfahren bei Kristallplatten ist das von Senarmont angegebene (Fig. 3828 Lb, 5). Man durchbohrt die Kristallplatte, bestreicht sie mit einer dünnen Wachsschicht und steckt sie in vertikaler Stellung an einen winkelförmig gebogenen Kupferdraht, welchen man mit einer Flamme erhitzt. Das Wachs schmilzt dann rings um den Kupferdraht in einer Ellipse, welche auch noch nach dem Erstarren sichtbar bleibt und deren Achsen die Richtung größter und kleinster Wärmeleitung darstellen [1].

Sella (Beibl. 24, 216, 1900) schneidet eine Schieferplatte senkrecht zu den natürlichen Spaltflächen, so daß diese mit den Kanten der Platte Winkel von 45° bilden, zerteilt sodann die Platte in zwei Hälften und verbindet diese derart miteinander, daß die Spaltrichtungen senkrecht zueinander stehen. Wird nun an die zur Berührungslinie der beiden Hälften senkrechte Seite der Platte ein dicker heißer Metallstab gelegt, nachdem die Platte mit Silberquecksilberjodid überzogen ist, so hat die Isotherme von 40°, welche durch die Grenzlinie zwischen gelber und roter

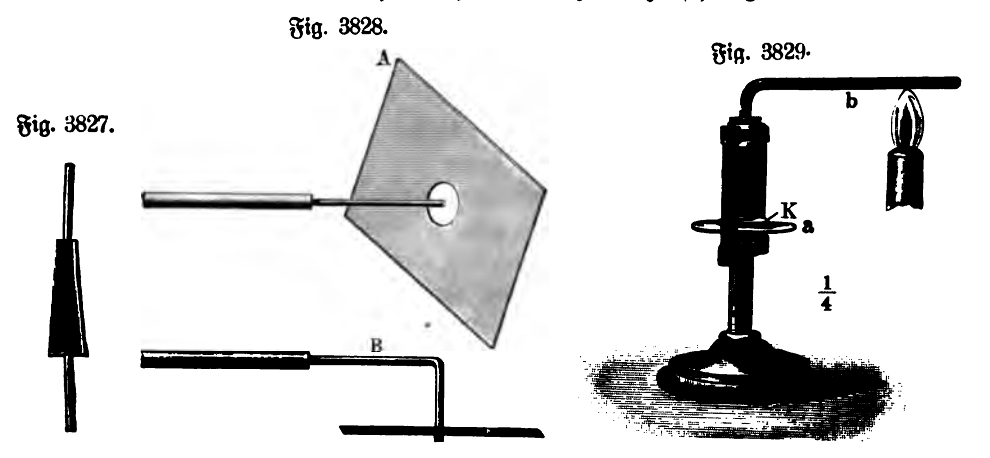


Fig. 3827. Fig. 3828. Fig. 3829.

Farbe des Jodids gekennzeichnet ist, in beiden Hälften der Platten eine verschiedene Lage, sie bildet also eine gebrochene Linie, während die Bewegung der Wärme notwendig senkrecht zur erhitzten Seite der Platte vor sich geht. Hierdurch ist bewiesen, daß in anisotropen Körpern nicht allein die Wärmeleitfähigkeit nach verschiedenen Richtungen verschieden ist, sondern daß die Bewegung der Wärme auch nicht normal zu den Isothermen erfolgt.

758. Thermostaten. Bunsen (1867) benutzt die Wärmeleitung fester Körper zur Veränderung der Heizwirkung. An den zu erhitzenden Apparat sind nämlich eine Anzahl horizontaler Kupferstäbe angesetzt, unter welche Bunsensche Brenner gestellt werden. Indem man deren Zahl oder Entfernung von der Ansatzstelle der Kupferstäbe ändert, wird auch die dem Apparat zugeführte Wärmemenge geändert.

Marignac benutzte bei seiner Bestimmung der Zersetzungswärme von Salmiak u. s. w. einen massiven cylindrischen Gußeisenblock, in welchen Löcher zur Aufnahme der Gefäße mit den zu erhitzenden Substanzen, sowie auch des Gefäßes eines Luftthermometers eingebohrt waren.

[1]) Fueß (Leiß, Die optischen Instrumente. Leipzig 1899, Engelmann, S. 102) gibt dem Senarmontschen Apparat für Wärmeleitung in Kristallen die Form Fig. 3829, wobei die Kristallplatte K durch einen Kupferdraht b gegen das Tischchen a gepreßt wird.

Kämmerer verwendet zum Abdampfen u. s. w. eine 2 bis 3 mm dicke Kupferplatte von 115 mm Durchmesser, welche mittels dreier 7 mm dicker, 60 mm langer Arme über einen Ring von 20 mm Höhe und 1 mm Dicke befestigt wird, der auf den Stern eines Bunsenschen Brenners aufgesetzt wird.

Sandbäder. Sehr vielfach gebraucht werden Sandbäder, d. h. metallene (eiserne) mit Sand gefüllte Schalen, in welche der zu erhitzende Körper eingesetzt werden kann. Da der Sand sich den Formen des Körpers allenthalben gleich gut anschmiegt und da er die Wärme schlecht leitet, wird eine sehr gleichmäßige Temperatur erzielt. Stolba (1882) schlägt zur Erhitzung von Glasgefäßen statt des Sandes schuppigen Graphit vor, da dieser die Gefäße nicht zerkratzt und ermöglicht, höhere Temperaturen zu erreichen. Für spezielle Zwecke hat man auch den Sand durch wesentlich bessere oder schlechtere Wärmeleiter, wie z. B. Eisen- und Kupferfeilspäne oder Asbestwolle ersetzt.

Öfen. Von der schlechten Wärmeleitungsfähigkeit des feuerfesten Tones wird sehr vielfache und nützliche Anwendung gemacht bei Heizapparaten, welche eine hohe Temperatur erzeugen sollen, so z. B. bei Gebläseöfen (S. 460 und 465 bis 468).

759. **Leitungsfähigkeit tropfbar flüssiger Körper.** Bei den Flüssigkeiten findet die einfache Wärmeleitung nur dann statt, vorausgesetzt, daß sie sich beim Erwärmen ausdehnen, wenn sie von oben erhitzt werden. Im entgegengesetzten Falle tritt zur eigentlichen Wärmeleitung die Konvektion oder mechanische Wärmeübertragung. Infolge der Verminderung des spezifischen Gewichtes entstehen Strömungen, d. h. ein Teil der Wärme verwandelt sich in sichtbare Bewegungsenergie, welche dann durch die innere Reibung der Flüssigkeit wieder in Wärme umgesetzt wird.

Fig. 3830.



Eine solche mechanische Wärmeübertragung auf größere Entfernung könnte man z. B. mit einer thermodynamischen Maschine bewirken, von welcher eine Transmissionswelle oder Drahtseiltransmission nach der zweiten Station geführt ist, wo die von der Maschine erzeugte Arbeit durch Bremsung oder Betrieb eines Kompressors in Wärme umgesetzt wird. Da der Wirkungsgrad der thermodynamischen Maschine gemäß dem zweiten Hauptsatz begrenzt ist, würde eine solche mechanische Wärmeübertragung oder ein mechanisches Fernheizverfahren wenig zweckmäßig sein, da nur ein verhältnismäßig kleiner Teil der an der ersten Station aufgewandten Wärme an der zweiten nutzbar verwertet werden kann[1].

Zur Demonstration der Wärmeleitung in Flüssigkeiten umgibt man einen Glascylinder, wie Fig. 3830, mit einem blechernen Gefäße, füllt den Cylinder mit kaltem Wasser, in welchem etwas vom feinen Staube befreites Bernsteinpulver schwebt, stellt sodann ein Thermometer auf den Boden des Glascylinders und hängt ein zweites oben in das Wasser; nach dieser Vorbereitung füllt man heißes Wasser in das blecherne Gefäß. Bei diesem Versuche sieht man

[1]) Gleiches gilt für die elektrische Heizung.

Die mit dem erwärmten Wasser strömenden Bernsteinteilchen an den Wänden des oberen Teiles des Cylinders aufsteigen, während die kälteren Teile in der Mitte niedersinken. Das obere Thermometer steigt rasch, während das untere seinen Stand unverändert beibehält.

Bequemer sind die in den Fig. 3831 (S, 18) und 3832 (Lb, 7,50) dargestellten Formen des Apparates, von welchen erstere für Projektion bestimmt ist. In einem parallelepipedischen Troge kann man die aufsteigenden Schlieren in der Projektion sehen, wenn das darin befindliche Wasser durch eine am Boden

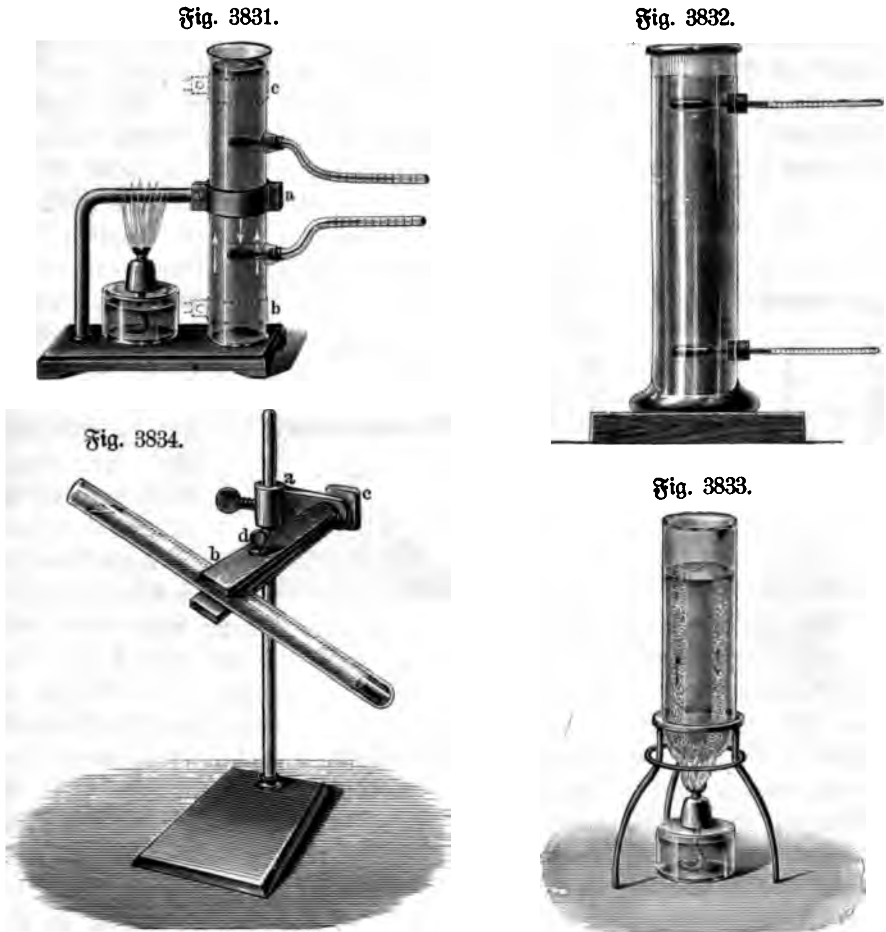


Fig. 3831. Fig. 3832. Fig. 3834. Fig. 3833.

angebrachte Dampfschlange erhitzt wird; ebenso die Schlieren beim Einbringen von Eis. Fig. 3833 (Lb, 24) zeigt einen Apparat zu gleichen Versuchen im kleinen. Die Strömung ist hier eine einseitige.

Hängt man in einen Cylinder mit kaltem Wasser ein Thermometer und gießt sodann vorsichtig heißes Öl auf das Wasser oder setzt ein Schälchen mit Weingeist darauf und zündet diesen an, so behält das Thermometer sehr lange Zeit seinen Stand unverändert bei.

Am einfachsten zeigt diese Erscheinung der Versuch, bei dem man eine einerseits zugeschmolzene Glasröhre mit Wasser füllt, dieselbe unten faßt und den oberen Teil in schiefer Lage über der Lampe erhitzt, bis das Wasser kocht.

Zu demselben Zwecke dient auch folgender Versuch. Man befestigt an irgend einem Stativ [1]), wie Fig. 3834, eine etwa 30 bis 36 cm lange und 3 cm weite, einerseits zugeschmolzene Glasröhre in schiefer Lage, schiebt auf ihren Boden ein Stück Eis und auf dieses ein Bleigewicht. Wird nun die Röhre mit Wasser gefüllt, so kann man dieses in dem oberen Teile der Röhre durch eine Weingeistlampe langsam bis zum Kochen erhitzen, ehe das Eis schmilzt.

Scriba (Z. 15, 26, 1902) benutzt als Wärmeindikator die dunkelblaue Verbindung von Stärke und Jod, welche sich bekanntlich schon unter 100° entfärbt und beim Abkühlen wieder blau wird. Einige Gramm Stärke werden gut in kaltem Wasser zerrieben und sodann durch Übergießen mit siedendem Wasser und nochmaliges Aufkochen unter Umrühren in dünnen Kleister verwandelt und dieser durch Zusatz einiger Tropfen Jodlösung schwarzblau gefärbt. Die Jodlösung erhält man dadurch, daß man einige Jodkristalle in wenig Wasser bringt, sie mit etwas festem Jodkalium überschichtet und, nachdem das Jod gelöst ist, umschüttelt. Mit einigen Kubikcentimetern dieses Jodkleisters färbt man Wasser, das sich in einer längeren, unten geschlossenen Glasröhre befindet, lebhaft blau und erwärmt diese an einer beliebigen Stelle mit einem Bunsenbrenner. Bald entfärbt sich die Flüssigkeit über der erhitzten Stelle bis oben hin, während sie darunter die blaue Farbe unverändert behält.

Fig. 3835.



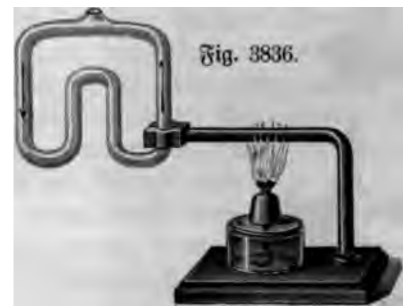


Fig. 3836.

Die Zirkulation des erwärmten Wassers kann man durch den in Fig. 3835 abgebildeten Apparat sehr gut zeigen. Eine als Rechteck zusammengebogene Glasröhre ist mit ihren beiden Enden in eine mit einem Einguß versehene Messinghülse gekittet; durch letztere wird sie mit Wasser, dem Bernsteinpulver beigemengt ist, gefüllt und durch das eben beschriebene Stativ in vertikaler Ebene befestigt, worauf man die eine untere Ecke durch eine Lampe erwärmt. Beim Anfertigen des Apparates werden die beiden Ecken *ab* zuerst gebogen, die eine sogleich eingekittet und die andere vorläufig mit Siegellack versehen und jetzt erst die beiden anderen Stellen gebogen, nachdem man die Mitte der Biegung durch Kreide aufgezeichnet hat. Übrigens kann die Röhre auch aus zwei Stücken bestehen, die durch vulkanisierten Kautschuk vereinigt werden.

Stöhrer konstruiert diese Vorrichtung in so kleinen Dimensionen, daß sie mittels des Projektionsapparates auf einen Schirm projiziert und somit die Strömung einer großen Zuhörerzahl demonstriert werden kann. (Fig. 3836 S, 7.)

[1]) Das Stativ in Fig. 3834 ist zu vielen Versuchen bequem; an dem verstellbaren Arme *a* desselben ist eine federnde, mit einer Schraube versehene Klemme *b* rechtwinklig angesetzt, welche in Fig. 2918, S. 1084 besonders abgebildet ist und sich um einen Zapfen drehen läßt; letzterer ist durch *a* gesteckt und endet in eine Schraube, mittels welcher und der Mutter *c* die Klemme in beliebiger Lage befestigt werden kann. Vor der Schraube *d* ist die Klemme mit Kork gefüttert.

Statt dem Wasser Bernsteinpulver beizumischen, kann man durch die obere Öffnung der Röhre etwas Anilinviolett einbringen, dasselbe wird dann von der Strömung mitgenommen.

Zur Demonstration der Unterschiede des Leitungsvermögens bei verschiedenen Flüssigkeiten benutze ich einen Dampfheizapparat, bestehend aus zwei dampfdurchströmten Blechcylindern, in welche gleich große Bechergläser eingehängt werden können, das eine 1 kg Wasser, das andere 2 kg Öl (spezifische Wärme 0,5, also von gleichem Wasserwert) enthaltend. Trotz der größeren Fläche, durch welche die Wärme in das Öl einströmen kann, erwärmt sich dieses weit langsamer.

Petruscheffskij (1882) bedient sich zweier gleicher Luftthermometer, in deren Gefäße (ähnlich wie beim Bunsenschen Eiskalorimeter) Reagenzgläschen eingelötet sind. In diese werden die Flüssigkeiten (Wasser und Quecksilber) eingefüllt und die Erwärmung von oben her durch einen eingetauchten dicken Kupferstab bewirkt, der durch eine Gasflamme erhitzt wird.

Looser (Z. 8, 294, 1895) benutzt zu gleichem Zwecke das Doppelthermoskop (S. 1054); ebenso Kolbe. Das Glasgefäß J (Fig. 3837) ist mittels eines Gummistöpsels in dem Gefäß A befestigt. Das innere Gefäß ist mit dem Halse durch den Gummipfropf geführt und wird durch einen Gummischlauch g und ein kurzes Glasrohr r mit dem Schlauche des Manometers verbunden. Das äußere Gefäß wird bis zur Marke m mit Flüssigkeit gefüllt, indem man an dem einen Schlauch S_1 saugt, während ein am anderen Schlauch S_2 angesetztes Röhrchen in die Flüssigkeit taucht.

Fig. 3837.



Benutzt werden bei einem Versuch zwei Doppelgefäße. Man taucht die Gefäße gleichzeitig bis zu der Marke m in Wasser von 50° bis 60° C, indem man sie mit einer mit Scharnieren versehenen Holzleiste mit Korkfassung faßt. Um die Flüssigkeiten in den Gefäßen belassen zu können, werden dem Apparat vier Gefäße für Wasser, Alkohol, Öl und Quecksilber beigegeben.

Trotz der schlechten Wärmeleitungsfähigkeit der Flüssigkeiten können durch dieselben, falls Konvektion eintritt, oder falls die Flüssigkeit künstlich in Strömung versetzt wird, große Wärmemengen fortgeführt werden. Hierauf beruht z. B. die Anwendung von Kühlschlangen, Kühlmänteln u. dergl.

In einer aus Papier gefalteten Schale kann man leicht Wasser zum Kochen bringen.

Eine von Wasser durchströmte Kupferröhre kann in das intensivste Feuer gebracht werden, ohne die geringste Beschädigung zu erleiden, falls nur der Wasserstrom genügend rasch ist.

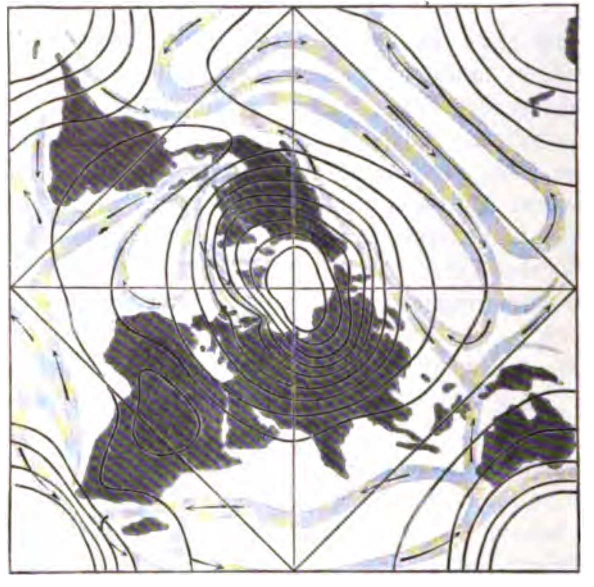
Saintignons Wasserstrompyrometer beruht darauf, daß Wasser, welches ein in den heißen Raum hineinragendes U-Rohr durchfließt, um so stärker erwärmt wird, je heißer der Raum, vorausgesetzt, daß die Durchflußgeschwindigkeit konstant ist.

760. Die Meeresströmungen werden zum Teil durch Wärmeunterschiede verursacht, zum Teil durch Windreibung (Drifte), zum Teil auch durch Ebbe und Flut (s. a. S. 1381, § 614).

Am bekanntesten ist der Golfstrom, der Wasser von 30° Anfangstemperatur an die

Westküsten von Europa bis Spitzbergen hinaufbefördert. (Beim Gefrieren eines Teiches im Winter bleiben wegen der Anomalie des Wassers konvektive Strömungen aus.)

Fig. 3838.



Zur Demonstration des Verlaufs der **Meeresströmungen** benutze ich die viereckige Weltkarte (Fig. 3838). Man kann insbesondere auf die Beeinflußung des Verlaufs der **Isothermen** durch den **Golfstrom** hinweisen.

Ist Salzwasser von Süßwasser überschichtet, so tritt eine Störung der Wärmeströmungen insofern ein, als die schwere Salzlösung nicht in das leichtere Wasser hinaufzusteigen vermag. Man beobachtet deshalb eine Anhäufung der Wärme an der Grenze beider Flüssigkeiten[1]).

Fig. 3840.



761. Thermostaten mit flüssigen Stoffen. Ein für physikalische Beobachtungen geeignetes Wasserbad erhält man, wenn ein rechtwinklig parallelepipedischer Kasten aus dünnem Kupferblech an zwei gegenüberstehenden Seiten mit großen Glasfenstern versehen wird (Glasscheiben mit Glaser-

Fig. 3839.

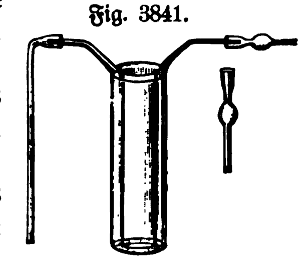


[1]) Siehe A. v. Kalecsinszky, Math. u. naturw. Anzeiger der Ungarischen Akademie 22, 29, 1904.

kitt in einer Nut befestigt). Die anderen beiden Seitenwände sind doppelt, um die direkte Berührung mit der äußeren Luft zu hindern, und um eventuell auch seitlich erwärmen zu können, wobei man unter die unten offene doppelte Wand einen Brenner setzt. Durch ein konstant in Tätigkeit gehaltenes Rührwerk, bestehend aus einem einfachen oder doppelten rechteckigen Blechrahmen, welcher in der Flüssigkeit auf- und abgeschoben wird, z. B. durch einen kleinen Heißluftmotor von Heinrici in Zwickau (S. 95, Fig. 193), oder eine Archimedische Schraube (Fig. 3839 Hu, 70 bis 100 und Fig. 3840 K, 55) werden die Temperaturdifferenzen an verschiedenen Stellen aufgehoben.

Zum Erwärmen lang ausgespannter Drähte, Röhren u. s. w. oder solcher kleiner Objekte, die in der Nähe betrachtet werden müssen, kann ein Wasser- oder Paraffinbad dienen, aus welchem die Flüssigkeit in konstantem Strome durch den zu erwärmenden Apparat durchfließt, hierauf in ein offenes Gefäß gelangt und aus diesem durch eine Pumpe aufgesaugt und wieder in das Bad zurückbefördert wird. Für horizontal ausgedehnte Apparate, in denen das Wasser nicht hoch hinauf getrieben werden muß, reicht eine Zentrifugalpumpe aus, für vertikal stehende ist eine gewöhnliche Saug- und Druckpumpe zweckmäßiger. Zum Bewegen der Pumpen dient am bequemsten ein kleiner Elektromotor [1]).

Fig. 3841.



Nicol (1883) empfiehlt, die Erwärmung eines Bades nicht durch untergesetzte Flammen zu bewirken, sondern durch ein Rohr, in welchem heißes Wasser zirkuliert. Um letzteres zu erhitzen, ist das Rohr außerhalb des Bades zu einer Spirale gewunden und wird hier durch einen Bunsenschen Brenner erhitzt.

Außer Wasser werden zu Bädern gebraucht: Glycerin, Öl, Paraffin, Paraffinöl oder Benzolin, Quecksilber, geschmolzenes Blei.

Damit die in Thermostaten auf konstante Temperatur zu erhitzenden Gefäße dieselbe möglichst rasch annehmen, muß ihre Oberfläche möglichst groß sein. Hierauf beruht z. B. die eigentümliche Gestaltung des Cylinderpyknometers nach Rudolphi. (Fig. 3841 [2]).

762. Natronsalzheizung. Bei der Natronsalzheizung wird die Wärme zunächst zur Arbeitsleistung durch Schmelzen verbraucht und diese Arbeit beim Erstarren wiedergewonnen. Eine Mischung von 1 Vol. essigsaurem Natron und 10 Vol. unterschwefligsaurem Natron (Nieske 1881) wird in einem zu dreiviertel damit gefüllten luftdicht verlöteten Blechbehälter geschmolzen (was an dem Geräusch beim Schütteln zu erkennen ist) und der Behälter dann an den Ort gestellt, der erwärmt werden soll. Die Wärme hält 8 bis 15 Stunden, je nach der Größe der Apparate, gleichmäßig an, bis alles wieder erstarrt ist.

763. Eisbäder. Zur Herstellung konstanter niedriger Temperaturen dienen schmelzendes Eis (0°) und schmelzende Kryohydrate, d. h. Mischungen (nicht chemische Verbindungen) von Eis und Salzen in solchem Verhältnis, daß die Bestandteile gleichzeitig schmelzen und beim Erstarren beide gleichzeitig auskristallisieren. Hammerl stellt folgende Tabelle zusammen:

[1]) Siehe S. 137, § 31 und O. Lehmann, Ztschr. f. Instrumentenkunde 2, 89, 1882. — [2]) Zu beziehen von R. Müller-Uri, Braunschweig, zu 7,50 Mk.

Mischung	Schmelzpunkt	Mischung	Schmelzpunkt
$HgCl_2 + 450\,H_2O$	— 0,2°	$SrN_2O_6 + 33{,}5\,H_2O$ . . .	— 6°
$KClO_3 + 222\,H_2O$	— 0,5	$BaCl_2 + 40\,H_2O$	— 7,2
$NaSO_4 + 116\,H_2O$	— 0,7	$K_2Cr_7O_4 + 18{,}8\,H_2O$ . . .	— 10,2
$BaN_2O_6 + 259\,H_2O$	— 0,9	$KCl + 16{,}61\,H_2O$ . . .	— 10,5
$K_2Cr_2O_7 + 292\,H_2O$	— 1	$NH_4Cl + 12{,}4\,H_2O$ . . .	— 16
$K_2SO_4 + 114{,}2\,H_2O$	— 1,5	$NaNO_3 + 8{,}13\,H_2O$ . . .	— 16,5
$FeSO_4 + 7H_2O + 414\,H_2O$.	— 1,7	$NH_4(NO_3) + 5{,}72\,H_2O$ . . .	— 17
$CuSO_4 + 44\,H_2O$	— 2	$(NH_4)_2SO_4 + 10\,H_2O$	— 17
$Na_2CO_3 + 92{,}7\,H_2O$	— 2,2	$SrCl + 6\,H_2O$	— 18
$KNO_3 + 44\,H_2O$	— 2,7	$NaCl + 10{,}5\,H_2O$ . . .	— 22
$ZnSO_4 + 20\,H_2O$	— 7	$NH_4J + 6{,}4\,H_2O$	— 27
$MgSO_4 + 24\,H_2O$	— 6	$CaCl_2 + 6H_2O + 8{,}45\,H_2O$	— 54,9

764. Wärmeleitung der Gase. Für die Wärmeleitung der Gase gilt ähnliches wie für die der Flüssigkeiten. Die Konvektion zeigt sich hier ganz besonders auffallend, z. B. bei einem großen flachen Glaskasten, in welchen man an einer Ecke unten eine brennende Kerze einsetzt. Ich benutze einen solchen von 1 qm Seitenfläche und 1 dcm Tiefe.

Fig. 3842.

Looser (Z. 8, 293, 1895) zeigt das Aufsteigen erwärmter und das Niedersinken abgekühlter Luft mittels einer Papprohre von 10 bis 15 cm Durchmesser, an deren eines (unteres bzw. oberes) Ende eine Holzkohle bzw. ein Becherglas mit Kältemischung gehalten werden, während am anderen Ende das Gefäß des Luftthermoskops angebracht wird.

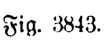
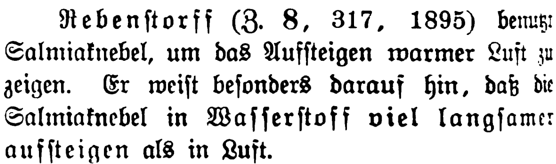


Fig. 3843.



Rebenstorff (Z. 8, 317, 1895) benutzt Salmiaknebel, um das Aufsteigen warmer Luft zu zeigen. Er weist besonders darauf hin, daß die Salmiaknebel in Wasserstoff viel langsamer aufsteigen als in Luft.



Czermak breitet auf dem Boden eines Glaskastens eine Rauchschicht aus und erhitzt sie an einer Stelle durch einen galvanisch glühenden Draht (Fig. 3842). Der Platinstift eines Holzbrandapparates (S. 1202) wäre wohl ebenfalls verwendbar.

Sehr hübsch und lehrreich sind ferner die Versuche mit dem Schlierenapparat, durch welchen die über einer Flamme oder einem erhitzten Körper aufsteigenden warmen Luftströme als Schlieren vergrößert auf einen Schirm projiziert werden. Ich benutze hierzu die elektrische Laterne im Projektionshäuschen (S. 155) ohne Linsen. In etwa 1 bis 2 m Entfernung davon wird ein Gasbrenner aufgestellt und ein Schattenbild desselben auf dem 6 m großen Schirm entworfen.

Mittels eines horizontalen, auf einer Spitze drehbaren Windrädchens aus Papier, oder einer Spirale aus Papier (Fig. 3843) kann man leicht die Strömungen in der Nähe eines warmen Ofens oder über einer Flamme nachweisen. (Licht an der Tür, chemischer Rührer, Fig. 3840, Störung beim Abwägen warmer Körper; ein erhitzter Körper erscheint infolge der Luftströmungen leichter als er ist.)

765. Verschiedenheit des Wärmeleitungsvermögens. Man kann dieselbe z. B. zeigen mittels des Apparates Fig. 3844 (Lb, 28), welcher oben durch in Wasser eingeleiteten Dampf auf 100° erhalten wird, während der untere durch die eingeführten Röhren mit verschiedenen Gasen gefüllt werden kann.

Kundt (1877) verfährt in folgender Weise. Ein 15 mm weites und 20 cm langes Reagenzglas ist in ein weiteres ebenfalls unten geschlossenes Glasrohr eingeschmolzen, welches mit dem betreffenden Gase gefüllt wird,

Fig. 3844.

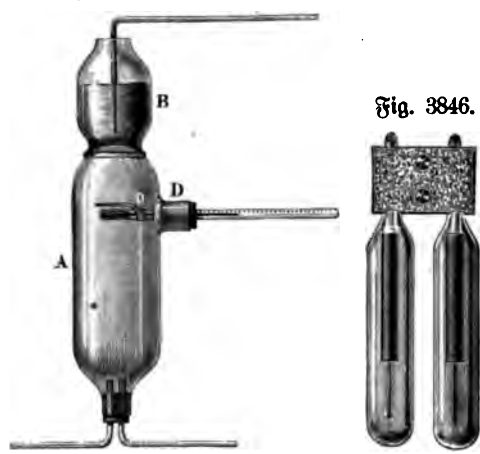


Fig. 3846.

Fig. 3845.



während in das Reagenzglas selbst Äther eingegossen wird. Man stellt den Apparat in siedendes Wasser und zündet den sich bildenden Ätherdampf an der Mündung des Reagenzglases an. Je besser das Gas leitet, um so höher wird die Flamme[1]. (Fig. 3845 Lb, 30.)

Looser (Z. 8, 294, 1895) und Kolbe benutzen statt der Ätherindikatoren die beiden Gefäße des Doppelthermoskops (S. 1054); Maiß (Z. 9, 289, 1896) ein Differentialmanometer; Rebenstorff mit Thermoskopfarbe bestrichene Stäbe (Fig. 3846, Bestandteil seines Thermoskopapparats Lb, 18).

766. Das Vakuum. Verbindet man bei dem eben erwähnten Versuch von Kundt den Zwischenraum zwischen den beiden Glasröhren mit der Luftpumpe und evakuiert, so läßt sich auch leicht zeigen, daß das Leitungsvermögen bis zu gewissem Maße vom Druck unabhängig ist.

Die Wärmeleitung der Gase, welche als Diffusion der Wärmebewegung betrachtet werden kann, ist nämlich abhängig von der mittleren freien Weglänge

[1]) Siehe auch Schwalbe und Lüpke, Z. 3, 267, 1890.

zwischen zwei Zusammenstößen. Wird bei konstanter Temperatur der Druck erhöht, so wächst die Zahl der die Bewegung übertragenden Moleküle, im gleichen Verhältnis nimmt aber die mittlere Weglänge ab. Ebenso wie die Reibung ist deshalb die Wärmeleitung in weiten Grenzen, aber nicht überhaupt, vom Druck unabhängig.

Looser (Z. 15, 261, 1902) und Kolbe zeigen das Verhalten des Vakuums mittelst des Doppelthermoskops. Auch die S. 1527 erwähnten Dewarschen Doppelgefäße können, falls man deren zwei gleiche besitzt, von welchen das eine nicht evakuiert ist, sehr gut dazu dienen, den Unterschied im Erkalten einer eingebrachten warmen Flüssigkeit oder der Verflüchtigung von eingebrachter flüssiger Luft zu zeigen.

767. Luftbäder. Nach L. Meyer leiden die meisten einfachen Luftbäder an folgenden Mängeln: 1. daß ihre Temperatur oben und unten verschieden ist; 2. daß sie mit der Zeit sich ändert; 3. daß sie nur bis zu einer mäßigen Hitze zu steigern ist und 4. dabei einen ganz unverhältnismäßigen Gasaufwand erfordert. Er selbst gab aus diesem Grunde den Luftbädern eine solche Form, daß die direkte Erhitzung nur von den Seitenwänden und von oben erfolgt und zwar nicht direkt durch die Flamme, sondern durch die heißen Verbrennungsprodukte der Flamme, welche mit möglichst wenig überschüssiger Luft gemischt sind und zwar derart, daß diese in dreifacher Schicht den zu heizenden Raum umspülen und dabei die heißeste Schicht außen liegt. Letztere erhält noch einen Schutzmantel aus schlechtleitendem Material (Asbestpappe oder doppelte Wand, ausgefüllt mit Schlackenwolle oder Kieselgur), in einzelnen Fällen auch Tonplatten. Auf solche Weise vermochte er mit einem einzigen Bunsenschen Brenner gewöhnlicher Größe einen Raum von 5 Liter Inhalt dauernd auf 300° zu erhitzen, selbst wenn derselbe unten offen war.

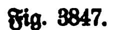
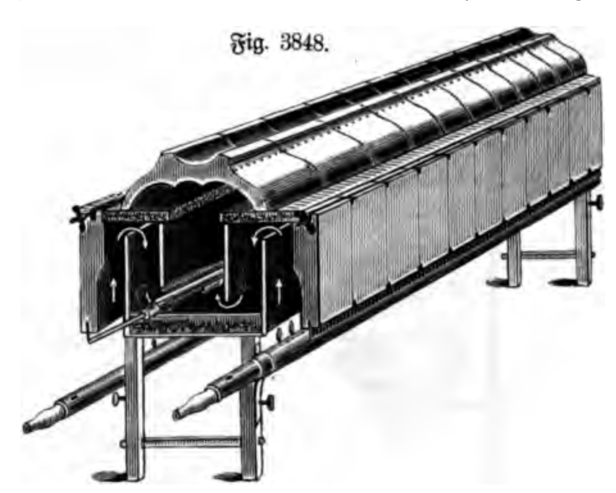

Fig. 3847.



Fig. 3847 stellt ein aus vier konzentrischen Cylindern zusammengesetztes Luftbad dar, welches sowohl als Trockenkasten, sowie zur Destillation von Stoffen, die sich an der erhitzten Glaswand leicht zersetzen, oder auch zur trockenen Destillation bei einer genau bestimmten Temperatur, z. B. der Äpfelsäure, Zitronensäure u. s. w., benutzbar ist.

Vier Cylinder umschließen den zu erhitzenden innersten Raum, welcher oben durch den aufgesetzten, dreifach tubulierten, mit Regulierung für den Durchtritt der Heizgase versehenen Deckel, und unten durch den doppelten, auf einem Dreifuß sitzenden Boden verschlossen werden kann. Letzterer bildet ein auf- und abzuschiebendes wegnehmbares Tischchen. Die Heizung geschieht durch den mit regulierbarem

Luftzutritt versehenen und an den drei Füßen des Apparates hoch und tief verstellbaren Flammenkranz. Der Gasaufwand zur Erhaltung einer Temperatur von 300° in einem 6 Liter großen Raum beträgt in vier Stunden etwa 1 cbm. Indem die Flämmchen nirgendwo das Metall unmittelbar berühren, sondern den zu erwärmenden Raum nur mit den mit möglichst wenig überschüssiger Luft gemischten Verbrennungsprodukten in der Art umgeben, daß diese in dreifacher Schicht von außen nach innen strömend, ihn ringsum einhüllen, und die äußerste heißeste Schicht entweder durch einen mit schlechten Wärmeleitern ausgefüllten doppelten Kupfercylinder, oder durch einen feuerfesten Toncylinder geschützt wird, erhält man in selbst 1 m hohem Luftbad bei richtiger Handhabung der auf dem Deckel ruhenden Regulierung eine gleichmäßige Temperatur[1]). Über **Luftheizung, Kalorifere** siehe S. 241.


Fig. 3848.

768. Wärmeübertragung durch Dämpfe. Während in den bisher besprochenen Fällen die Wärme von dem Orte, wo sie entstand, an den Ort, wo sie zur Wirkung kommen sollte, übertragen wurde, entweder durch einfache Leitung in festen Körpern oder durch Leitung und Strömung in flüssigen und gasförmigen (Warmwasser- und Luftheizung), so geschieht die Wärmeübertragung bei den Dampfbädern durch Verwandlung in Arbeit (durch Verdampfung) und Rückumwandlung dieser Arbeit in Wärme an dem zu erwärmenden Orte (s. a. S. 1562), wie es im großen bei der **Dampfheizung** geschieht. Bei den Dampfheizapparaten wird also die Wärme indirekt übertragen, indem sie zunächst in latente Dampfwärme umgesetzt und dann von neuem durch Kondensation des Dampfes gewonnen wird. (**Fernheizwerke.**)

Kleine Dampfkessel zu Heizzwecken finden bei chemischen und physikalischen Arbeiten häufige Anwendung[2]). (Vergl. S. 38.)

Die einfachste Form ist das sogenannte **Wasserbad** der Chemiker. Als solches kann jedes Kochgefäß, am besten ein solches aus Kupferblech, dienen, auf

[1]) Zu beziehen von Mechaniker **Bühler** in Tübingen in verschiedenen Sorten, aus Kupfer, Eisen, Nickel, Aluminium oder Chamotte hergestellt, Preis etwa 70 Mk. für gewöhnliche Größe: innere Höhe 24 cm, innerer Durchmesser 20 cm. Andere Größen kosten je nach dem Gewicht mehr oder weniger. Bei Bestellung ist es gut, die Angabe zu machen, ob das Luftbad bis 100°, 200°, 300°, 400° oder 500° gewöhnlich erhitzt wird, indem dann bei Anfertigung des Flammenkranzes die diesbezügliche notwendige Anzahl der Gasflämmchen Berücksichtigung findet. Sollen alle möglichen Temperaturen erzeugt werden können, so werden mehrere verschiedene Flammenkränze beigegeben. Röhrenöfen, analog den eben erwähnten Luftbädern nach **Lothar Meyer** (Fig. 3848) liefert **Bühler** zu 35 bis 48 Mk. — [2]) Um rasch größere Flüssigkeitsmengen in Bechergläsern auf bestimmte Temperatur zu erhitzen, benutze ich ein **Dampfbad**, welches an die Dampfleitung im Auditorium (S. 39) angeschlossen wird.

welches ein Deckel mit Löchern aufgesetzt wird, in welche die zu erhitzenden Schalen, Tiegel u. s. w. gerade einpassen. Für sehr kleine Tiegel verengt man die Öffnungen durch Auflegen von Ringen wie bei Kochherden. Zweckmäßig verengt sich das Kochgefäß am Boden zu einer nach unten cylindrischen Ausstülpung, so daß die im Kochen zu erhaltende Wassermenge nur gering ist. Der Wärmeverlust wird dadurch erheblich vermindert. Soll das Bad längere Zeit in Gebrauch bleiben, so verbindet man einfach das Siedegefäß mit einem zweiten, in welchem konstantes Niveau hergestellt wird, sei es nach dem Prinzip des Mariotteschen Gefäßes, oder nach dem Prinzip des selbsttätigen Hahnes mit Schwimmer oder einfach dadurch, daß man konstant Wasser zutropfen läßt in etwas größerer Menge, als solches verdunstet und das überschüssige durch ein seitliches, in der Höhe des gewünschten Niveaus angebrachtes Abflußrohr (Überfallrohr) konstant abfließen läßt. Das Überfallrohr wird dabei so konstruiert, daß es sich höher und tiefer stellen läßt, sei es derart, daß man es von unten mittels eines durchbohrten Korkes in das Gefäß mit konstantem Niveau mehr oder minder hoch einschiebt, oder daß man das Gefäß mit konstantem Niveau durch einen Kautschukschlauch mit dem Siedegefäß verbindet und so auf einem Stativ befestigt, daß es sich höher oder tiefer stellen läßt. Bei den käuflichen Wasserbädern ist eine solche Vorrichtung meist dauernd mit dem Kochgefäß verbunden [1]).

Fig. 3849.



Ein häufig angewandtes Wasserbad erster Art ist dargestellt in Fig. 3849 (M. 7,50, mit Trichter 17,75). Der obere von den beiden Schläuchen auf der rechten Seite dient zum Zuleiten des Wassers, der andere, an das Überfallrohr angestreifte, leitet den Überschuß fort. Das Siedegefäß faßt nur wenig Wasser, die Heizfläche und Arbeitsfläche dagegen sind möglichst groß, so daß die Wärme des Brenners aufs vollkommenste ausgenutzt wird, was keineswegs von allen im Gebrauch befindlichen Wasserbädern behauptet werden kann. Der darüber befestigte L. Meyersche Trichter trägt dazu bei, die Verdampfung der in der aufgesetzten Porzellanschale befindlichen abzudampfenden Flüssigkeit durch den erregten Luftzug zu beschleunigen und dieselbe gegen Staub u. s. w. zu schützen. Ein Teil des Dampfes kondensiert sich an demselben, sammelt sich am unteren Rande und kann durch den dort befindlichen Tubulus abgelassen werden.

Bei physikalischen Untersuchungen stellt man sich Dampfbäder häufig in der Art zusammen, daß man ein kleines Dampfkesselchen mit einem Rückflußkühler so kombiniert, daß der Dampf beim Austritt aus dem zu heizenden Apparat durch den Kühler wieder zu Wasser verdichtet wird und von unten her in den Kessel zurückgelangt. Das Ende des Kühlers muß also bis auf den Boden des Dampfkessels reichen oder unten in denselben einmünden, während der Dampf oben ausströmt.

[1]) Dr. H. Rohrbeck, Berlin, liefert einfache Wasserbäder zu 4 bis 8 Mk., mit Nachlaufgefäß nach Fresenius zu 12 bis 15 Mk., mit konstantem Niveau nach Kekulé zu 12 Mk.

Flüssigkeiten anderer Art als Wasser, welche sich praktisch zu Dampfbädern eignen, sind in folgender Tabelle (nach H. Hammerl 1882) nebst den Siedepunkten bei 760 mm Barometerstand zusammengestellt:

Flüssigkeit	Siedepunkt	Flüssigkeit	Siedepunkt
Aldehyd	22,1°	Anilin	185,6°
Äther	35,5	Karbolsäure	188,0
Schwefelkohlenstoff	48,1	Phenol	188,3
Aceton	56,3	Amylbenzol	193,0
Chloroform	62,2	Orthotoluidin	197,0
Jodäthyl	64,5	Naphtalin	212,0
Methylalkohol	65,5	Äthylbenzoat	213,4
Essigsäureäthyläther	74,3	Nitrobenzol	220,6
Alkohol	78,05	Antimonchlorid	223,4
Benzol	80,4	Benzoesäure	249,9
Salpetersäurehydrat	86,0	Methylbenzoat	261,2
Wasser	100,0	Resorcin	271,0
Ameisensäure	105,3	Zimmetsäure	290,0
Salzsäure	110,0	Quecksilberchlorid	295,0
Toluol	111,0	Diphenylamin	310,0
Zinnchlorür	115,7	Leinöl	316,0
Essigsäure	117,3	Schwefelsäuremonohydrat	325,0
Buttersäureäthyläther	119,5	Phenanthren	340,0
Bromwasserstoffsäure	126,0	Quecksilber	357,2
Amylalkohol	131,8	Paraffin	370,0
Essigsäureamyläther	138,1	Antimonjodid	400,9
Xylol	139,0	Schwefel	447,5
Chlorschwefel	144,0	Wismutchlorid	490,0
Buttersäure	157,0	Kadmium	860,0
Terpentinöl	157,0	Zink	1040,0

Eine Änderung des Barometerstandes von 1 mm bedingt eine Änderung des Siedepunktes von Wasser um ungefähr 0,03°.

Um stoßendes Kochen zu vermeiden, läßt man Luft in feinen Blasen durch die Flüssigkeit gehen (oder leitet, wenn möglich, einen schwachen elektrischen Strom hindurch, welcher Gasblasen erzeugt). Damit die Menge der Flüssigkeit nicht geringer werde, schließt man das Gefäß, in welchem die Flüssigkeit enthalten ist, luftdicht und verbindet es mit einem Rückflußkühler, welcher alle entstandenen Dämpfe wieder zu Flüssigkeit verdichtet und diese in das Gefäß zurückleitet.

Verbindet man das offene Ende des Rückflußkühlers mit einem Rezipienten, in welchem die Luft verdünnt oder verdichtet werden kann, so kann man durch geeignete Regulierung des Druckes innerhalb gewisser Grenzen die Siedetemperatur auf gewünschte Größe bringen.

Alluard (1864), Pfaundler (1867) und Lothar Meyer (1877) haben, wie hier nur kurz erwähnt sein mag, Apparate konstruiert, welche nach diesem Prinzip funktionieren.

In anderer Weise kann man auch die Siedetemperatur ändern durch Zusatz von fremden Beimischungen, speziell bei Wasser durch Zusatz von Salzen oder von Schwefelsäure.

Apparate nach diesem Prinzip sind konstruiert worden von Sprengel (1873) und Laspeyres (1874).

Nach Hammerl sind folgende Mischungen geeignet, wobei die Salzlösunge[n] derart konzentriert sind, daß die Siedetemperatur mit der Sättigungstemperatu[r] zusammenfällt:

Beimischung	Siedepunkt	Beimischung	Siedepunkt
Chlorsaures Kali	104,40°	Chlorstrontium	118,25°
Chlorbaryum	104,60	Salpetersaures Natron	121,30
Kohlensaures Natron	104,63	Essigsaures Natron	124,47
Phosphorsaures Natron	106,50	Kohlensaures Kali	135,30
Chlorkalium	108,55	Salpetersaurer Kalk	151,10
Chlornatrium	108,60	Chlorzink	162,30
Chlorammonium	114,20	Essigsaures Kali	169,00
Neutrales weinsaures Kali	114,97	Chlorcalcium	179,60
Salpetersaures Kali	116,50	Salpetersaures Ammoniak	180,00

Für Schwefelsäure:

$SO_3 . H_2O$	317,35°	$SO_3 . 7H_2O$	120,05°
" $2H_2O$	228,10	" $8H_2O$	116,23
" $3H_2O$	178,72	" $9H_2O$	114,15
" $4H_2O$	149,18	" $10H_2O$	112,36
" $5H_2O$	134,18	" $11H_2O$	110,80
" $6H_2O$	125,88	" $12H_2O$	109,40

Ändert man nicht nur das Mischungsverhältnis, sondern auch den Druck, s[o] genügen drei bis vier Hydrate für die Temperaturen von 40 bis 317,35°. E[s] sind nämlich die Siedetemperaturen bei:

Hydrat	Druck mm	Siedepunkt	Hydrat	Druck mm	Siedepunkt
$SO_3 12H_2O$	39,79	40°	$SO_3 2H_2O$	92,43	160°
"	65,52	50	"	129,00	170
"	105,00	60	"	178,50	180
"	164,00	70	"	244,91	190
"	250,13	80	"	333,31	200
"	372,56	90	"	450,05	210
"	543,00	100	"	603,00	220
"	700,00	107,06	"	700,00	225,2
"	760,00	109,4	"	760,00	228,1
$SO_3 4H_2O$	30,10	70	$SO_3 H_2O$	67,20	230
"	51,00	80	"	85,71	240
"	83,00	90	"	114,80	250
"	130,08	100	"	150,69	260
"	196,96	110	"	199,06	270
"	289,00	120	"	261,94	280
"	411,60	130	"	347,98	290
"	584,00	140	"	460,86	300
"	700,00	146,68	"	616,00	310
"	760,00	149,18	"	700,00	314,52
$SO_3 2H_2O$	65,65	150	"	760,00	317,35



Die Schwierigkeit bei Anwendung der Schwefelsäure besteht in der Wah[l] eines passenden Siedegefäßes; Glas ist zu zerbrechlich, Blei zu weich und Platin z[u]

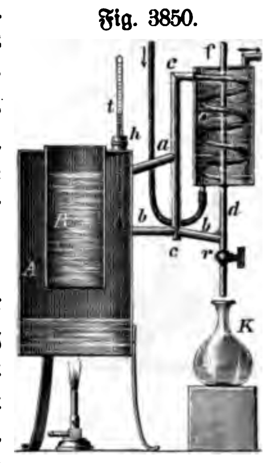
teuer. Alluard (1864) empfiehlt folgende Mischungen: Für Temperaturen zwischen 35,5° bis 47,7°: Mischungen von Äther und Schwefelkohlenstoff; für Temperaturen zwischen 47,7° bis 78,5°: Mischungen von Schwefelkohlenstoff und Alkohol; für Temperaturen zwischen 78,5° und 100° Mischungen von Alkohol und Wasser.

Reynold (1862) empfiehlt Mischungen von Glycerin und Wasser (1 : 6 = 103,3° 1 : 1 = 110°; 3 : 1 = 121°).

Fock (1885) gebraucht Petroleum und destilliert bei geöffnetem Hahn des Gefäßes so lange die leicht flüchtigeren Bestandteile desselben ab, bis der gewünschte Siedepunkt erreicht ist. Alsdann wird der Hahn geschlossen, so daß nun das Gemenge durch die Wirkung des Rückflußkühlers seine Zusammensetzung behält.

Der Apparat hat die in Fig. 3850 dargestellte Form. Der Dampf tritt durch die Röhren *a* und *c* in das Schlangenrohr, wird hier kondensiert und die entstandene Flüssigkeit läuft durch die Röhren *b* und *d* wieder in das Siedegefäß zurück. Wird eine höhere Temperatur gewünscht, so öffnet man den Hahn *r* und läßt so lange die destillierte Flüssigkeit in den untenstehenden Kolben abfließen, bis der Rückstand die gewünschte Siedetemperatur erreicht hat.

Fig. 3850.



769. Der Leidenfrostsche Versuch beruht auf der geringen Wärmeleitungsfähigkeit der Gase in Verbindung mit dem Latentwerden der Wärme. Man nimmt einen großen aus dickem Kupferblech getriebenen runden flachen Löffel (Fig. 3851) oder eine Kupferschale (Fig. 3852 Lb, 2), macht ihn glühend und läßt dann aus einer Pipette eine kleine Menge Wasser darauf fallen. Bleibt der Löffel auf dem Feuer, so verdunstet das Wasser unter fortwährender zitternder und rotierender Bewegung, wobei größere Tropfen oft eine fast eckige Gestalt annehmen, sehr langsam, und das letzte kleine Kügelchen verpufft auf einmal. Nimmt man aber den Löffel vom Feuer, so zeigt das Wasser, bald nachdem die Glühhitze aufgehört hat, Adhäsion zum Löffel und verdampft unter Aufkochen sehr rasch; gleiches geschieht, wenn der Löffel beim Auftropfen des Wassers zu stark abgekühlt wird. Mit einem silbernen Kaffeelöffel läßt sich der Versuch auch wohl machen. In einem Platintiegel kann man so viel Wasser anhäufen, daß ein Thermometer hineingesenkt werden kann, es zeigt 90° bis 99° C, wenn der Versuch längere Zeit dauert. Will man die zitternden Bewegungen und die eckigen Figuren, welche der Tropfen annimmt, gut sehen, so muß der Löffel an irgend einem passenden Stativ befestigt werden; Schalen oder Tiegel kommen auf die gewöhnlichen Gestelle mit einschraubbaren Ringen, am besten auf Drahtdreiecke. Auch mit anderen Flüssigkeiten als mit Wasser kann der Versuch angestellt werden.

Fig. 3851.

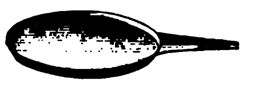
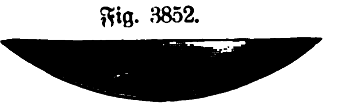


Fig. 3852.



Wird der Leidenfrostsche Tropfen in einer kleinen kupfernen Flasche erzeugt und diese zugestöpselt und sich selbst überlassen, so wird nach einiger Zeit der Stöpsel mit starkem Knall herausgeschleudert. (Dampfkesselexplosionen nach Abstellung der Feuerung.)

Nach A. W. Hofmann (1874 und 1882) gelingt auch die Umkehrung des Versuches, indem man ein rotglühendes Ellipsoid von Silber in Wasser taucht oder besser einen Kolben aus Platin, welcher durch ein innen angebrachtes Knallgasgebläse auf Weißglut gehalten wird.

Ein interessantes Experiment teilt Sire (1853) mit. Hält man in einem Reagenzgläschen von etwa 25 mm Durchmesser Schwefeläther auf einer Temperatur von 32° und läßt einen Tropfen-Salpetersäure oder Schwefelsäure darauf fallen, so sinkt dieser nicht unter, sondern schwimmt unter lebhafter Bewegung auf der Oberfläche, an Volumen stetig zunehmend, bis er etwa zwölfmal so groß geworden ist, wie zu Anfang.

Wenn man in einer 1 dcm tiefen eisernen Pfannenschale ein gehöriges Quantum Blei schmilzt (5 bis 10 kg), so kann man angeblich ohne alle Beschädigung mit der Hand ein wenig darin rühren und verspürt sogar eine Abkühlung, wenn man die Hand mit Äther befeuchtet hat (Vorsicht vor Entzündung); dickere Oxydschichten müssen vorher entfernt werden, auch muß man sich vor der Berührung der Pfanne in acht nehmen.

Fig. 3853.

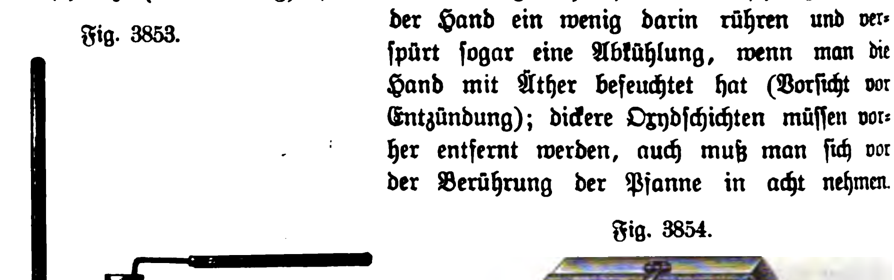
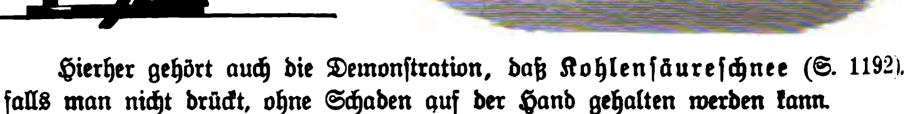


Fig. 3854.



Hierher gehört auch die Demonstration, daß Kohlensäureschnee (S. 1192), falls man nicht drückt, ohne Schaden auf der Hand gehalten werden kann.

Das Gefrieren von Quecksilber im glühenden Tiegel (Faraday). Eine Platinschale wird zum Glühen erhitzt und Brei von Kohlensäureschnee und etwas Äther eingetragen, der rasch nachgefüllt werden muß, in dem Maße, als er sich verflüchtigt. Man legt sodann ein kleines Drahtdreieck auf und auf dieses einen zu 1/4 mit Quecksilber gefüllten Platintiegel, der in den Brei eintaucht, aber nicht den Boden der Schale berührt. (Fig. 3853 nach Weinhold.[1]) Das Quecksilber wird mit einem eingebogenen Stäbchen herausgeholt.

770. **Wärmeschutz.** Von der geringen Wärmedurchlässigkeit poröser Stoffe, deren Poren mit Luft erfüllt sind, macht man mannigfachen Gebrauch, um Wärmeverluste (z. B. bei Dampfleitungen, siehe S. 39 bezw. 1559) oder Kälteverluste (z. B. bei Eiskellern) zu hindern. Die sogenannte Kochkiste ist eine mit Holzwolle oder ähnlichem Material ausgepolsterte Kiste, in welche die auf Siedetemperatur erhitzten

[1]) Siehe auch B. Schwalbe, Z. 9, 11, 1896.

Kochtöpfe hineingestellt werden. Diese behalten ihre Wärme so lange, daß nach einigen Stunden die Speisen ohne weitere Erhitzung gar werden[1]).

Große Kristalle können nach Stölzel erhalten werden, indem man die heiß gesättigte Lösung eventuell auf einem mit heißem Wasser gefüllten Gefäß in eine mit langhaarigem Filz ausgekleidete Kochkiste (Fig. 3854) bringt und darin einige Tage ruhig stehen läßt.

771. **Äußeres Wärmeleitungsvermögen.** Erhitzt man einen Stab an einem Ende, so verbreitet sich die Wärme großenteils längs des Stabes, zum andern Teil geht sie an der Oberfläche zur Luft über, es wird also im Prinzip die von

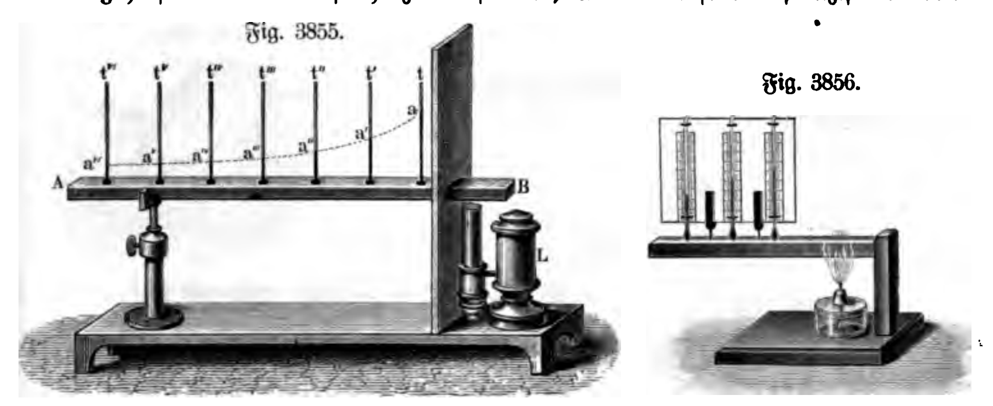
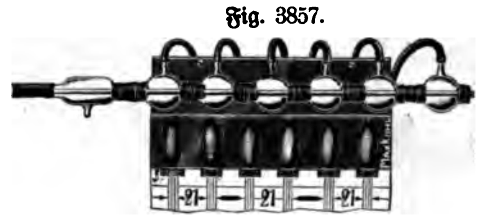


Fig. 3855.

Fig. 3856.

dem Stab nach außen ausströmende Wärme wesentlich abhängig sein von den Strömungen in der umgebenden Luft. Bei der großen Differenz der Wärmeleitungsfähigkeiten kann man indes in erster Annäherung die äußere Wärmeleitung, in welcher auch die später zu besprechende Strahlung inbegriffen ist, ebenso wie die innere als konstant annehmen und auf diesem Wege Wärmeleitungskonstanten bestimmen.

Fig. 3857.



Zur Demonstration der Temperaturverteilung in einem Stabe bei konstantem Wärmestrom werden nach Despretz in gleichabstehende Bohrungen gleiche Thermometer eingesetzt. (Fig. 3855 E, 65.)

Stöhrer konstruiert den Apparat (indes mit nur drei Thermometern) so klein, daß es möglich ist, denselben zu projizieren. (Fig. 3856 S, 15.)

Kolbe benutzt mehrere Thermoskope. Ein Metallstab, Fig. 3857 (6 mm dick, 350 mm lang), ist luftdicht durch sechs kleine kugelförmige Rezeptoren geführt, während ein Ende in ein kleines Dampfgefäß hineinragt.

Falls man mehrere Stäbe anwendet, empfiehlt es sich, jeden mit sechs Rezeptoren und dem kleinen Gefäß für den Dampf zu versehen, da das Einstellen mühsam ist.

Ein einfacher und mit sehr geringen Mitteln herzustellender Apparat zur Demonstration der Verschiedenheit des Wärmeleitungsvermögens ist von Tyndall angegeben. Zwei gleich große gerade cylindrische Stäbe aus verschiedenen Metallen,

[1]) Kochkisten aus Blech unter der Bezeichnung „Selbstkocher“ sind zu beziehen von Otto Stoll, Karlsruhe, Kaiserplatz.

z. B. Eisen und Kupfer, sind hintereinander zu einem einzigen Stabe zusammengesetzt und horizontal auf passenden Stativen befestigt. Auf die untere Seite der Stäbe klebt man mittels Wachs in regelmäßigen Abständen kleine Holzkugeln auf und erhitzt dann den Stab in der Mitte, wo die beiden Teile zusammengesetzt sind, durch eine untergesetzte Flamme. Alsbald schmilzt das Wachs in der Nähe und die Kügelchen fallen eines nach dem anderen herab. An dem Kupferstab aber fallen die Kügelchen rascher und in größerer Anzahl herunter als beim Eisenstab (Fig. 3858). Statt der Holzkugeln kann man auch Schrotkügelchen verwenden.

Fig. 3859 (S, 9,50) zeigt einen anderen einfachen Apparat, beruhend auf der Anwendung eines Differentialthermometers, dessen Kugeln auf die Enden der zu

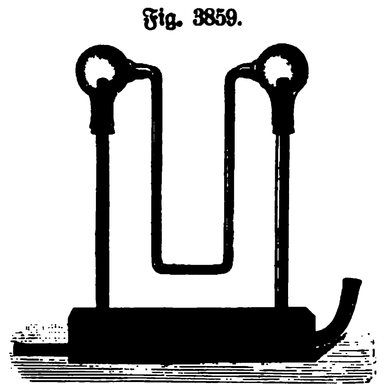
Fig. 3858.



Fig. 3860.



Fig. 3859.



vergleichenden Metallstäbe aufgesetzt sind, welche unten z. B. durch Dampf erhitzt werden.

Petruschefskij (1882) empfiehlt zwei Luftthermoskope von gleicher Größe mit Gefäßen aus Kupfer, an welche die zu vergleichenden Metallstäbe mit einem Ende befestigt werden. Letztere erhalten Ω-Form und werden so befestigt, daß die Schenkel vertikal stehen. Unter dem freien Ende wird dann eine Gasflamme untergesetzt. Die Röhren der Luftthermoskope sind starkwandige runde oder platte Glasröhren mit emaillierter Rückseite, um das Steigen und Fallen der Flüssigkeit weithin sehen zu können. Dieselben verlaufen vertikal abwärts und tauchen unten in Gefäße mit gefärbter Flüssigkeit. Um den Apparat für den Versuch zu präparieren, wird durch verschließbare seitliche Röhrchen aus den Gefäßen zunächst so viel Luft ausgesaugt, daß die Flüssigkeitssäulen über $\frac{1}{2}$ m hoch stehen. Die Dimensionen sind im übrigen so gewählt, daß nach 15 bis 20 Minuten der Stand in dem Thermoskop, welchem die Wärme durch den Kupferstab zugeleitet wird, um 250 bis 350 mm gefallen ist, in dem anderen, mit einem Eisenstab verbundenen nur um 70 bis 80 mm.

Zur gleichzeitigen Untersuchung mehrerer Stäbe dient der Apparat Fig. 3860 nach **Ingenhouß**. An ein Gefäß von Messingblech werden vier bis sechs gleiche kurze Röhrchen gelötet, in welche man gleich dicke und gleich lange Stäbchen aus verschiedenen Substanzen, wie Messing, Eisen, Blei, Glas, Holz, durch Reibung feststeckt. Taucht man nun diese Stäbchen in geschmolzenes Wachs, so daß sie einen dünnen Überzug davon erhalten, und gießt in das Gefäß siedend heißes Wasser, oder noch besser, falls nicht mit Zinn gelötet ist, heißes Öl, so schmilzt auch das Wachs an den Stäbchen, aber auf ungleiche Entfernung vom Gefäß.

Stöhrer läßt, was zweckmäßiger ist, die Stäbe vom Boden des Gefäßes aus vertikal abwärts gehen (Fig. 3861 S, 12 bis 18) und befestigt daran Schrotkörner mit Wachs. Derselbe gestaltet den Apparat auch so klein, daß er projiziert werden kann. (S, 10.)

Nach Weinhold (1881) werden die Stäbchen besser mit Quecksilberkupferjodid statt mit Wachs bestrichen [1]). (Fig. 3862.)

Fig. 3863 (S, 24) zeigt eine andere Form nach Stöhrer.

Mühlenbein (1889) befestigt am Ende eines starken, horizontal befestigten Kupferstabes senkrecht zu diesem in gleichen Abständen strahlenartig divergierend sechs Stäbchen beziehungsweise bestehend aus: Messing, Zink, Zinn, Neusilber, Wismut und Holz, welche mit Quecksilberkupferjodid rot angestrichen sind. (Fig. 3864 K, 24.) Wird das andere Ende des Kupferstabes durch eine untergesetzte Flamme erhitzt, so sieht man die Bräunung der Farbe verschieden rasch fortschreiten. Eine doppelte, auf der den Stäbchen zugekehrten Seite geschwärzte und mit konzentrischen, mit Goldfarbe aufgetragenen Kreisen versehene, auf den Kupferstab aufgeschobene Pappscheibe (Fig. 3865) dient einerseits zur Erleichterung der Beobachtung, andererseits zur Abhaltung der strahlenden Wärme der Flamme [2]).

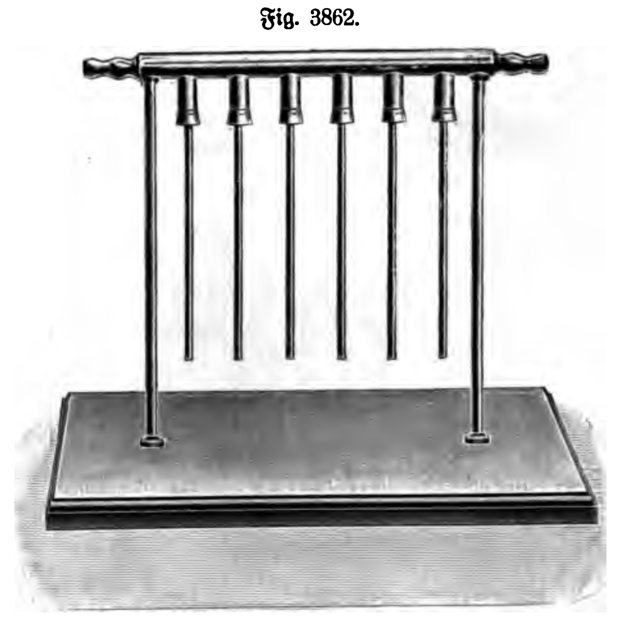

Fig. 3862.



Fig. 3861.

Noack (1886) hat nach gleichem Prinzip einen vereinfachten Apparat konstruiert, welcher gleichzeitig die Vergleichung mehrerer Stäbe gestattet. Diese Stäbe gehen strahlenförmig von einem zu erhitzenden Kupferblock aus und endigen in den Gefäßen kleiner Luftthermometer, deren Röhren vertikal aufwärts gerichtet sind und unten sich in die Kugeln hinein fortsetzen. Dort tauchen sie in eine entsprechende Quantität gefärbter Flüssigkeit ein. Der Stand der Flüssigkeit wird durch Ein-

[1]) Einen solchen Wärmeleitungsapparat mit sechs verschiedenen Metallstäben, wovon eine Seite mit Quecksilbersilberjodid, die andere mit Quecksilberkupferjodid bestrichen ist, zum Dampfdurchleiten eingerichtet, Fig. 3862, liefert G. Lorenz in Chemnitz zu 16 Mk. —

[2]) Das Quecksilberkupferjodid darf nicht mit Schellacklösung auf Eisen oder Zink fixiert werden, da sonst Zersetzung infolge des Feuchtigkeitsgehalts der Lösung eintritt. Man verwende z. B. Dammarlack oder Zaponlack. Sehr gut dürfte sich der polymerisierte Lack der Elektralackfabrik in Bruchsal eignen.

Fig. 3864.

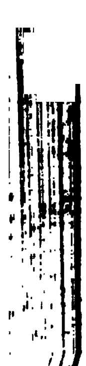
Fig. 3865.

Fig. 3866.

Fig. 3863.

Fig. 3868.

Fig. 3867.



schieben eines Kolbens (Glasstäbchens) durch einen seitlichen Tubulus des Gefäßes reguliert oder auch durch Saugen an einem Hahn. (Fig. 3866 E, 27,50.)

Looser (Z. 11, 165, 1898) konstruierte den in Fig. 3867 E, 115 dargestellten Apparat. Silber konnte nicht verwendet werden, da es kleinere Leitungsfähigkeit zeigte als Kupfer, während sie in Wirklichkeit im Verhältnis 100 zu 74 größer ist.

Fig. 3868 zeigt eine Abänderung des Apparates nach Kolbe.

Auf dem Wärmeaustausch zwischen Luft und den angrenzenden festen Körpern beruht auch zum Teil die Verminderung der Geschwindigkeit von Luftwellen in engen Röhren.

772. Flammen und Explosionen. Die Form einer Flamme ist wesentlich bedingt durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wärme, insofern der Verbrennungsprozeß darauf beruht, daß die Reaktionsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur größer wird. Aus gleichem Grunde hängt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Explosion von der Beschaffenheit der Gefäßwände ab.

Ich demonstriere die letztere an einer etwa 12 m langen und 3 bis 4 cm weiten Glasröhre, welche aus einzelnen Stücken zusammengesetzt ist und mit explosiblem Gemisch von Grubengas und Luft gefüllt wird. Entzündet man die Mischung am einen Ende, so sieht man eine kegelförmige Flamme durch das Rohr hindurcheilen, deren Geschwindigkeit sich gut mit der Sekundenuhr bestimmen läßt.

Fossati (1884) füllt einen Behälter aus Blech mit einer Scheidewand aus Drahtnetz mit einer Mischung von Gas und Luft. Entzündet man die Mischung am einen Ende, so pflanzt sich die Explosion nur bis zum Drahtnetz fort, wie leicht daran zu erkennen ist, daß man nun auf der anderen Seite ebenfalls wieder eine Explosion hervorrufen kann.


Fig. 3870. Fig. 3869. Fig. 3871.

773. Die Sicherheitslampe. Die Wirkung des Drahtnetzes an derselben erläutert man, indem man in die Flamme einer Weingeistlampe horizontal ein Stückchen Drahttuch hält, wie man es als Abfall von den Siebmachern bekommen kann. Das Gewebe muß so eng sein, daß etwa 10 bis 15 Fäden auf 1 cm kommen. Die Flamme wird durch das Gewebe eben abgeschnitten und bildet einen leuchtenden Ring um den noch unverbrannten mittleren Teil des aufsteigenden Gasstromes (Fig. 3869). Das durch die Öffnungen des Drahttuches dringende Gas läßt sich zwar oberhalb desselben wohl wieder anzünden, brennt aber nicht fort. Zündet man das Gas nicht unter, sondern über dem Netz an, so kann man die Flamme mit letzterem emporheben (Fig. 3870).

Mit einer Sicherheitslampe (Fig. 3871 E, 8,50) kann man die Erscheinung

ganz einfach zeigen, indem man aus einem Schlauch, welcher in einem Stück Glasrohr endigt, einen Leuchtgasstrom dagegen leitet. Das Gas brennt im Inneren des Drahtnetzes, die Flamme dringt aber erst dann nach außen, wenn das Drahtnetz glühend wird.

774. Ventilation und Heizung. Um die Strömungen der Luft über einem erhitzten Körper zu zeigen, genügt es, derselben etwas Tabak- oder Salmiakrauch beizumengen. Interessant ist namentlich die Demonstration des durch einen Lampencylinder erzeugten Luftzuges, wozu man nur nötig hat, in einen vertikal stehenden Cylinder von unten eine Kerzenflamme einzuführen, und ferner die Luftzirkulation in einem geschlossenen Gefäße, z. B. (nach Arendt) einer dreihalsigen, mit einem oder mehreren seitlichen Tubulis versehenen Glasflasche. Man senkt durch eine der Öffnungen eine kleine brennende Kerze oder einen heißen Körper ein, die unten an dem zur Öffnung gehörigen Stöpsel mittels eines Drahtes befestigt sind, und schließt dann abwechselnd die eine oder andere der Öffnungen der Flasche.

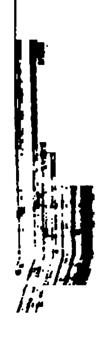
Um die Luftströmungen bei Heizung und Ventilation eines Zimmers im kleinen nachzuahmen, bedient sich Arendt eines geschlossenen Kastens aus Spiegelglasplatten, in welchen ebenso eine Flamme oder ein erhitzter Körper eingeführt werden kann und durch Schließen an verschiedenen Stellen angebrachter Öffnungen, sowie durch Verschieben von Ventilationsröhren die verschiedenartige Wirkung verschiedener Ventilationssysteme demonstriert werden kann.

Mittels einer Kerzenflamme kann man auch an der nur wenig geöffneten Zimmertür den oben nach außen, unten einwärts gerichteten Luftzug nachweisen.

Die Funktion eines Schornsteines pflege ich zu demonstrieren an einem etwa 4 m hohen an einem Stativ befestigten Ofenrohr, unter welches ein kleiner Gasherd gesetzt wird. Bringt man unten Schnitzel von Seidenpapier hinein, so werden sie nach einiger Zeit oben durch den Luftstrom herausgeworfen; man kann also auf diese Weise leicht die Windgeschwindigkeit messen. Zur Messung der Druckdifferenz könnte ein empfindliches Manometer nach Art des Zugkraftmessers von Custodis (kleiner Glockengasometer als Manometer, S. 972) gebraucht werden.

Die Demonstration dieser Erscheinungen ist nicht nur mit Rücksicht auf die Technik der Feuerungen nützlich, sondern auch zur Erklärung der Entstehung der Winde und mit Rücksicht auf die dabei stattfindende Umwandlung von Wärme in Bewegungsenergie.

In letzterer Hinsicht kann man die Frage nach dem Wirkungsgrad einer Heizanlage aufwerfen, ob z. B. sich derselbe nicht verbessern ließe durch Erzeugung des Zuges mittels einer Heißluftmaschine, welche einen Ventilator betätigt, wie ja bei manchen Heiz- und technischen Feuerungsanlagen tatsächlich Ventilatoren oder Gebläse zur Erzeugung des Zuges Anwendung finden. Die Luftmenge muß natürlich zur Vermeidung unnötiger Abkühlung der Feuerung so klein wie möglich sein (Lokomotivenblasrohr).



Meidinger demonstriert die Eigentümlichkeiten eines gewöhnlichen Schornsteines an einem kleinen von ihm zu diesem Zwecke ersonnenen Modell, ähnlich Fig. 3872 (E, 20). Der Fuß enthält nicht wie bei diesem einen Brenner, wohl aber einen seitlichen Schieber, welcher dem Putztürchen der gewöhnlichen Kamine entspricht und zu zeigen gestattet, daß das Offenstehenlassen des Putztürchens die Wirkung eines Kamins bedeutend beeinträchtigen kann. Beim Versuch zündet man

die unterste Kerze an und öffnet den Rohrstutzen, vor welchem sie brennt, während die beiden anderen geschlossen bleiben. Nun nähert man die Flamme der Öffnung so weit, daß sie eben noch gerade aufsteigt. Bläst man nun mittels eines Blasebalges schräg von unten gegen das obere Ende des Kamins, so wird die Flamme sofort hineingezogen und bleibt auch darin, da sich dasselbe immer mehr erhitzt, der Zug also stärker wird. Bläst man aber schräg von oben, so wird sie herausgetrieben und geht nicht mehr von selbst hinein. Öffnet man, nachdem sie hineingezogen wurde, die oberen Stutzen oder das Putztürchen, so wird der Zug bedeutend verschlechtert. Er wird aber verbessert, wenn man auch die beiden oberen Flammen anzündet.

Fig. 3872.

Wird das den Schornstein umgebende Mantelrohr mit kaltem Wasser gefüllt, so ist es nicht mehr möglich, Zug hervorzubringen, der Schornstein „bläst", d. h. die Flamme wird durch den herabsinkenden kalten Luftstrom herausgetrieben [1]).

Fig. 3874.

Niemöller (Z. 7, 25, 1893) benutzt das in Fig. 3874

Fig. 3873.

dargestellte, aus Lampencylindern zusammengesetzte Schornsteinmodell. Die beiden Cylinder *d*, *e* sind durch ein Rohr *c* von 10 cm Länge und 2 cm Weite verbunden. Zündet man die Kerze *a* an, so steigt die Luft in *d* auf. Ist der Cylinder heiß geworden, so vertauscht man ihn mit dem andern, indem man gleichzeitig die Flamme auslöscht. Der Rauch strömt dann nicht mehr nach oben, sondern durch das Verbindungsrohr nach dem heißen Cylinder. Zündet man beide Kerzen an und setzt gleichzeitig rasch über die eine Flamme einen kalten, über die andere einen heißen Cylinder, so erlischt die Flamme im kalten infolge der herabsinkenden schweren Luft. Statt dessen kann man auch nur über die eine Flamme einen Cylinder setzen und erst wenn dieser heiß geworden einen kalten Cylinder über die andere Flamme. Wird der Cylinder *d*, wenn beide Flammen brennen, durch Aufsetzen des punktierten Cylinders erhöht, so wird die Flamme in *b* ausgeblasen.

[1]) Einen zu gleichem Zwecke dienenden Apparat zeigt Fig. 3873 (S, 8,50).

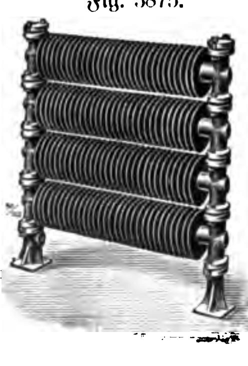
Man kann hier ferner hinweisen auf den von Meidinger erfundenen Dauerbrandofen, die verschiedenen technischen Feuerungsanlagen wie Flammöfen, Muffelöfen, die Verwendung von Rippen-Heizkörpern mit großer Oberfläche bei Dampfheizungen[1]) u. s. w..

775. Entstehung der Winde[2]). Bei Erhitzung der Luft vom Erdboden aus, wie sie in äquatorialen Gegenden stattfindet, dehnt sich dieselbe aus, wird also spezifisch leichter als die umgebende, somit der Druck

Fig. 3876.



Fig. 3875.



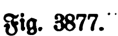


Fig. 3877.

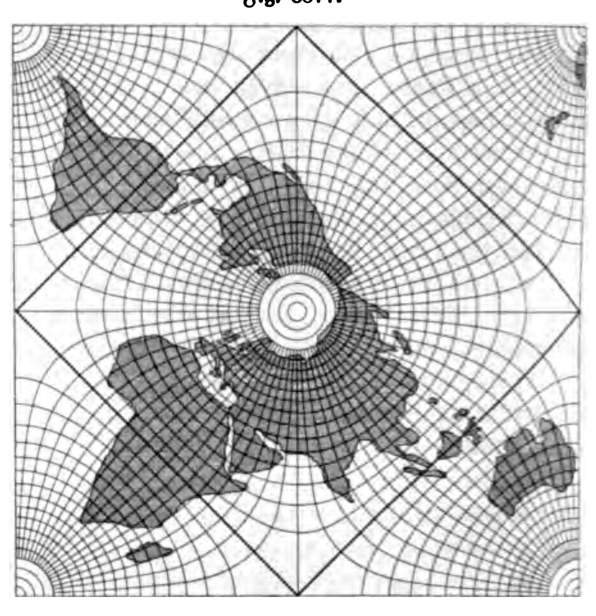
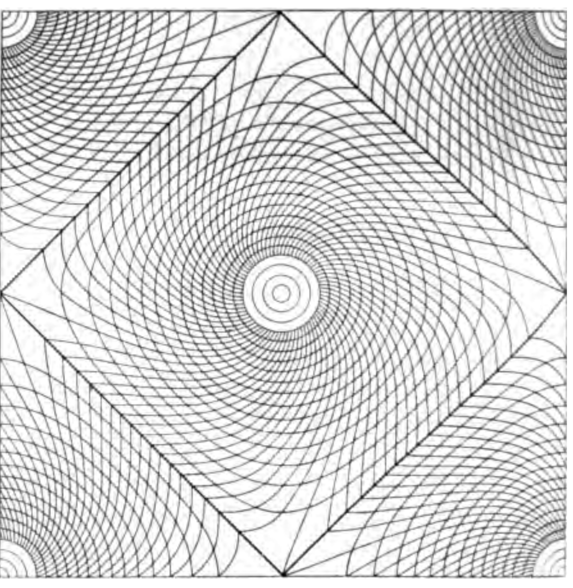


Fig. 3878.



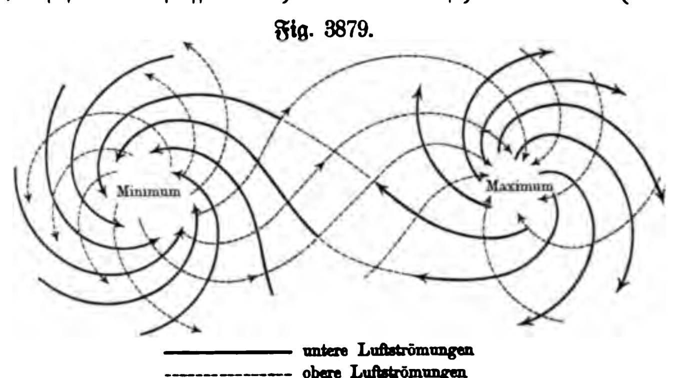
[1]) Fig. 3875 zeigt Körtings Doppel-T-Rippenrohrelemente, die billigste Form der Heizkörper für Dampfheizungen, Fig. 3876 Zierheizkörper. Preis eines Ofens erster Art 23 bis 154 Mk. — [2]) Ein einfaches Beispiel der Entstehung von Winden bilden der Land- und Seewind, ersterer nach Sonnenuntergang entstehend infolge der rascheren Abkühlung des an das Meer angrenzenden Landes, letzterer nach Sonnenaufgang infolge der rascheren Erhitzung des festen Landes.

in der Nähe des Erdbodens kleiner als der der benachbarten kalten Luftschichten. Hierdurch entsteht der gegen den Äquator hin gerichtete Passatwind. Gleichzeitig erhöht sich an der erhitzten Stelle die Luft über die benachbarten Luftschichten an der Grenze der Atmosphäre (diese als scharfe Fläche gedacht), in den oberen Schichten wird somit der Druck größer als in der Umgebung, es findet ein seitliches Abströmen der Luft statt. (Antipassat[1]). Die Fig. 3877 und 3878 deuten die Ablenkung der Stromlinien infolge der Erdrotation an.

Käme die Luft mit der Geschwindigkeit Null vom Pol gegen den Äquator, so müßte die Richtung des Passatwindes nordöstlich sein. Da indes der Antipassat bei der Rückkehr zum Pol als Passat seine Geschwindigkeit nicht plötzlich verlieren kann, sie vielmehr nach dem Trägheitsgesetz behalten muß, erscheint er zunächst von nordwestlicher Richtung, da er rascher rotiert als die Erde. Erst allmählich in dem Maße, als sich die Geschwindigkeit durch Reibungswiderstände vermindert und Gegenden von größerer Umlaufsgeschwindigkeit erreicht werden, geht er in Nordostwind über.

In der Zone der veränderlichen Winde findet eine Durchkreuzung beider Strömungen statt, insofern der Passat durch ein barometrisches Minimum (Depression) in die Höhe steigt, gleichzeitig der Antipassat durch ein barometrisches Maximum herunter, was sich an verschiedenen Stellen wiederholen kann. (Fig. 3879.)

Fig. 3879.



Zur Entstehung eines barometrischen Minimums kann z. B. lokale Erhitzung (Bildung von Wasserdampf, welcher spezifisch leichter ist als Luft) Anlaß geben. Eine solche Depression verstärkt sich ganz von selbst, da infolge der Expansion der aufsteigenden Luft Abkühlung und infolgedessen Ausscheidung von Wasserdampf, also nachdem dieser als Regen zur Erde gekommen, Verminderung des Gewichts bewirkt wird. Ferner tritt eine Verstärkung der Depression ein durch die Zentrifugalkraft, da infolge der Erdrotation die Windrichtung nicht senkrecht zu den Isobaren steht, somit eine Rotation der Luftmasse zustande kommt, wie beim schrägen Einströmenlassen von Wasser in einen Trichter (S. 1394, Fig. 3551).

Das barische Windgesetz lautet: „Kehrt man dem Winde den Rücken zu so hat man auf der nördlichen Halbkugel den niedrigsten Luftdruck links und etwas nach vorn, den höchsten rechts und etwas nach hinten (für die südliche Halbkugel sind rechts und links miteinander zu vertauschen).“ Die Windgeschwindigkeit[2]) ist um so größer, je größer der Druckunterschied pro Längeneinheit (das Druckgefälle) ist. Barometrischer Gradient ist der Druckunterschied pro 111 km.

[1]) Über einen Apparat zur Erklärung der Ablenkung der Passate (sowie Bewegung vulkanischer Asche) siehe Hartl, Z. 10, 124, 1897; ferner Rosenberg, Z. 12, 335, 1899 (siehe a. S. 1382). — [2]) Über Anemometer zur Messung der Windgeschwindigkeit siehe S. 1447 u. 1462. Ein selbst registrierendes zeigt Fig. 3880 K, 775.

Rosenberg (Z. 12, 335, 1899) beschreibt folgenden Versuch: Eine Schicht Tabaksrauch von 3 bis 4 cm Dicke wird auf dem Boden des Glasgefäßes (eines großen Bunsenelementes) ausgebreitet und außerhalb des Gefäßes, fast am Niveau des Bodens, wird durch ein um eine vertikale Achse rotierendes und mit einigen Flügeln versehenes Rad ein Luftwirbel an der Wand des Gefäßes erzeugt; der Tabaksrauch wird sofort cyklonenartig in die Höhe getrieben. Dieser Versuch zeigt, daß die Wirbelbewegung sich auch über Erhebungen (den Rand des Gefäßes) fortpflanzt.

Fig. 3880.

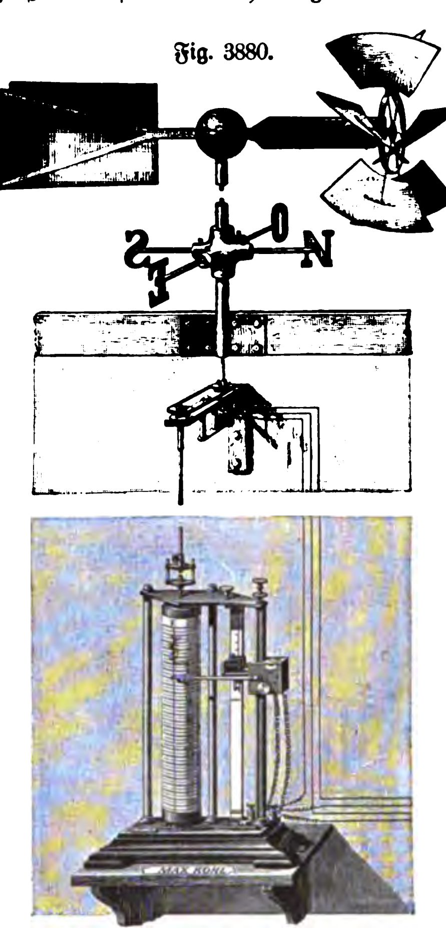


Fig. 3881.



776. Wolken und Regen. Wenn man Luft in einem innen benetzten Glasgefäße komprimiert und sie dann rasch entweichen läßt, so wird durch die entstehende Temperaturerniedrigung das ganze Gefäß mit Nebel erfüllt.

Um die Erscheinung wahrzunehmen, reicht schon ein großer Kolben aus, wie er für chemische Zwecke benutzt wird, und zur Verdichtung der Luft genügt es, sie mit dem Munde kräftig einzublasen, zu welchem Zwecke der Kolben mit einem durchbohrten Stopfen und einem kleinen Glasröhrchen als Mundstück versehen wird. (Fig. 3881 E, 3,50.)

Füllt man einen Kolben mit Luft, welche zuvor durch mit Glycerin befeuchtete Watte filtriert, d. h. von Staub befreit wurde, so tritt die Nebelbildung beim Evakuieren nach Kießling nicht ein, sie erfolgt aber von neuem, wenn man etwas Rauch von verbranntem Papier in die Flasche einläßt.

Bei Anwendung der S. 131 beschriebenen großen Luftpumpe zeigt sich die Nebelbildung sehr schön, insbesondere, wenn man zuvor etwas feuchtes Fließpapier in den Rezipienten gebracht hat. Sie kann auch auf größere Entfernung

durch dahinter gestellte kleine Gasflämmchen sichtbar gemacht werden. (Schneegrenze [Temperaturerniedrigung trockener Luft etwa 1° pro 100 m]; Hagelstadium [Freiwerden latenter Wärme, überschmolzene Tröpfchen, große Hagelkörner]; Schneestadium [Schneesterne], Platzregen, Wolkenbruch, Glatteis, Rauhreif u. s. w.)

Die Abnahme der Temperatur mit der Höhe, welche die Schneegrenze bedingt, ist auch bei der barometrischen Höhenmessung zu berücksichtigen. Sind die Barometerstände b_0 und b_1, so ist die Höhendifferenz der beiden Stationen in Metern

$$h = 18\,400\,(1 + 0{,}004\,t)\,(\log b_0 - \log b_1).$$

Infolge der Trockenheit der von Norden kommenden Luft ist auf der nordwestlichen Seite eines Wirbels der Himmel klar, infolge des großen Wassergehalts der aus dem Süden kommenden umgekehrt die südöstliche Seite mit Regenwolken bedeckt. Bei 25° und 66 Proz. Feuchtigkeit findet der Niederschlag schon in 0,8 km Höhe statt. Die Wolken sind also hier niedrig (bis 2 km Höhe). Die oben als Antipassat austretende Strömung führt die sogenannten Cirruswolken (Federwolken, Schäfchen) mit sich, deren Höhe 8 bis 10 km beträgt. Da die Achse des Wirbels in der Richtung, in welcher er fortschreitet, geneigt ist, beobachtet man beim Herannahen eines Wirbelsturmes zuerst die von dem oberen Ende der Achse ausgehenden Cirruswolken, welche öfters infolge der Bildung von Windwogen in sehr regelmäßigen Abständen auftreten [1]).

Fig. 3882.



Man weise auch hin auf die Bedeutung der näheren Untersuchung für Seefahrt, Landwirtschaft, Wetterprognose, Gesundheitsverhältnisse in Städten (die Westseite empfängt, da die Zugstraßen der Minima meist nördlich liegen, Südwestwind von außen, also frische Luft, die Ostseite Südwestwind von innen mit Straßenstaub und Rauch) u. a.

Besonders häufig finden sich Wolken in 1,6, 4,2, 6,7 und 9,2 km Höhe; Schichtwolken in 800 m. Die feinen Federwolken treten in Nordschweden in 7 km, in den Tropen in 13 km Höhe im Durchschnitt auf. Die größte gemessene Wolkenhöhe beträgt $20^1/_2$ km. Der Abstand der Kämme von Wogenwolken beträgt 50 bis 2000 m, und zwar für Wolken in 2 bis 8 km Höhe 450 m. Die Zuggeschwindigkeit der Wolken beträgt bei Schichtwolken 6 bis 7 m, bei Regenwolken 9 m, bei Schäfchen 13 m und bei Federwolken 25 m pro Sekunde.

Während bei gleichmäßiger Dichte der Luft die Höhe der Atmosphäre nur etwa 8000 m sein könnte, ist sie mit Rücksicht auf das Boylesche Gesetz zu etwa 400 000 m anzunehmen. In dieser Höhe muß aber solche Kälte herrschen, daß dort Wolken von flüssiger oder fester Luft entstehen können [2]).

---

[1]) Durch den Versuch kann man nach Seitel das Entstehen der Windwogen zeigen, wenn man über eine raucherfüllte Kohlensäureschicht in einem Glaskasten einen Luftstrom hingleiten läßt. Der Rauch nimmt dann Wellenform an. — [2]) Meteore entzünden sich schon in einer Höhe von 300 000 m, wo die Dichte der Luft nur etwa der milliardste Teil der gewöhnlichen ist.

Die Niederschlagsmenge (Regenmenge) wird durch die Höhe in Millimetern bezeichnet, bis zu welcher das Wasser sich ansammeln würde, wenn es an der betreffenden Stelle bliebe. 1 mm entspricht einer Wassermenge von 1 Liter pro Quadratmeter. Einen einfachen Regenmesser[1]) zeigt die Fig. 3883, einen selbst registrierenden Fig. 3884 K, 275.

Fig. 3883.



Fig. 3884.



Eigentümliche Wirkungen treten ein beim Fortschreiten des Windes über Gebirge — Föhn (warme Fallwinde). Infolge der Ausscheidung von Wasser beim Hinaufsteigen und der dadurch bedingten Wärmeentbindung tritt nur unerhebliche Abkühlung trotz der Expansion ein, beim Heruntersinken aber sehr starke Erwärmung infolge der Kompression, da die Wassertröpfchen vom Gebirge zurückgehalten wurden und nicht wie sonst unter Wärmeverbrauch (Temperaturerniedrigung) sich wieder verflüchtigen. (Feuergefährlichkeit des Föhns wegen Trockenheit und Wärme.)

In dem sogenannten Kondensationsstadium, d. h. bei Ausscheidung von Wasserdampf, beträgt die Abkühlung der Luft beim Emporsteigen 0,6° für 101 m, beim Heruntersinken im Trockenstadium die Erwärmung 1° für 101 m.

Rebenstorff (Z. 17, 19, 1904) beschreibt verschiedene Vorlesungsexperimente zur Demonstration, daß sich mit Wasserdampf gesättigte Luft bei Expansion und Kompression in thermischer Hinsicht anders verhält als trockene, welche sich an das Verfahren von Clement und Desormes (S. 1519) anschließen. Von zwei gleichen Flaschen wird die eine innen benetzt, die andere durch eingebrachte Schwefelsäure

[1]) Regenmesser von verschiedener Form, z. B. nach Fig. 3882, liefert R. Fueß, Steglitz-Berlin, desgl. andere meteorologische Instrumente. Siehe auch R. Börnstein, Leitfaden der Wetterkunde, Braunschweig 1901, Friedr. Vieweg u. Sohn. Arrhenius, Lehrbuch der kosmischen Physik, Leipzig, Hirzel. van Bebber, Die Wettervorhersage, Stuttgart 1898, F. Enke. Polis Wolkentafeln, Karlsruhe, Braunsche Hofbuchdruckerei. Börnstein, Schul-Wetterkarten (12 Stück), Berlin, Dietrich Reimer (Ernst Vohsen).

oder Glycerin getrocknet. Bei der Kompression werden beide verbunden, so daß der Anfangsdruck der gleiche ist.

Labiles Gleichgewicht (starke Erhitzung am Boden) bedingt das Auftreten von Sand- und Wasserhosen.

Wood (Beibl. 23, 418, 1899) erwähnt, daß mittels feinen Sandes das Entstehen solcher Wirbelwinde auf einer erhitzten Metallplatte nachgewiesen werden kann.

Aufsteigen der Luft längs einer Linie bedingt walzenförmige Wirbel mit horizontaler Achse (Gewitterwalzen, Böen). Auf der Vorderseite der fortschreitenden Walze ist die Luftbewegung gering, um so stärker auf der Rückseite, wo die Ausscheidung des Regens stattfindet [1]).

Was die Erklärung der Gewitter [2]) anbelangt, so wäre insbesondere auf die Übersättigungszustände des Wasserdampfs hinzuweisen, den Einfluß des Staubes auf die Kondensation (Radius der Tröpfchen etwa 0,0002 mm, daher nach dem zweiten Hauptsatz Dampfdruck größer als normale Dampftension), auf die Kondensation durch Jonen, Bildung solcher durch radioaktive Stoffe, insbesondere aber durch die in den äußersten Schichten der Atmosphäre absorbierten ultravioletten Sonnenstrahlen, die Erhöhung der Spannung durch Zusammenfließen der Tröpfchen, Entstehung des Blitzes u. s. w. Die letztgenannten Erscheinungen können hier natürlich nur angedeutet werden und man kann diese Andeutung zu einem Übergang zu der nunmehr sich anschließenden Darlegung der elektrischen Erscheinungen und Strahlungen gestalten. Auch in historischer Hinsicht ist der Blitz die älteste Beobachtung auf elektrischem Gebiete.

---

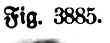
[1]) Die raschen Luftdruckvariationen bei stürmischem Wetter lassen sich nachweisen mit der Drucklibelle von Fr. C. G. Müller, welche so empfindlich ist, daß sie schon auf die kleinen Druckschwankungen beim Öffnen einer Zimmertür reagiert (S. 962). — [2]) Siehe A. Gockel, Das Gewitter, Köln 1905, Bachem.

Nachträge zu Band I.

Abteilung 1:

Zu S. 12, § 2. Steinzeug-Wandtafel-Stoffe liefert Aug. Feßler, Wien XVII, Weißgasse 38, in Breite von 1,6 m zu 8 bis 12 Mk. pro Quadratmeter und Papier in 1,4 m Breite zu 1 Mk. Diese Stoffe können benutzt werden: a) in Doppelrahmen gespannt (auf beiden Seiten zu beschreiben); b) zum Überziehen vorhandener Holztafeln; c) auf Stäbe geheftet zum Überhängen anderer Tafeln.

Tafeln aus schwarzem, matt geschliffenem Glas sind im physikalischen Institut in Erlangen und im elektrotechnischen Institut in Wien in Gebrauch (siehe die Beschreibung des letzteren von Hochenegg). Um Zirkelspitzen aufsetzen zu können, werden letztere durch ein Kugelgelenk mit einer Saugscheibe aus Kautschuk verbunden. Diese wird nach einem durch den betreffenden Punkt gezogenen Kreuz zentriert.


Fig. 3885.



Zu S. 13, § 2. Eine bequeme Klemme zum raschen Aufhängen von Wandtafeln nach Fig. 3885 liefert Fr. Hugershoff, Leipzig, Karolinenstr. 13, zu 1 Mk.

Zu S. 14, § 3. In New York werden neuerdings Fußböden aus Papier hergestellt, welche keine Fugen haben, schlechte Wärmeleiter sind und kein Geräusch beim Betreten geben, außerdem bei weitem billiger sind, als Hartholzfußböden. Die Papiermasse wird in pulverisiertem Zustande in Säcken versandt, beim Gebrauch zu Brei gerührt, dieser mit Rollen aufgewalzt und dann nach Wunsch gefärbt.

Zu S. 24, § 6. Vierfach wirkende Automatpumpen für Dampf-, Luft-, Riemen- und elektrischen Antrieb liefert Otto Schwabe u. Co., Erfurt.

Zu S. 38, § 11. Dampfkessel liefert auch die Maschinen- und Dampfkesselfabrik „Guilleaume“-Werke Neustadt a. d. Hardt (Rheinpfalz); Wasserreiniger für Dampfkessel Louis Schröter, Maschinenfabrik Keppen; Wasserstandszeiger mit Schwimmer für Dampfkessel Wilh. Strube, Armaturenfabrik in Magdeburg-Buckau; Wasserstandsanzeiger mit Selbstschluß bei Glasbruch C. F. Pilz, Chemnitz; Ventile mit elastischer Metalldichtung das Institut für Gewerbehygiene, Berlin NW. 21, Alt Moabit 106.

Zu S. 39, § 11. Spermazit zum Verdichten und Einfetten für Mannlochverpackungen, Flanschen, Verschraubungen, Ventile, Hähne u. s. w. liefern, das Kilogramm zu 6 Mk., Fr. Dürr Söhne, Fabrik chemischer Präparate, Stuttgart.

Ohne diese Masse kleben die zum Verpacken anzuwendenden Gummi=, Asbest=, Papier= . . . Ringe derart fest, daß sie nur in Stücken losgerissen werden können, Hähne lassen Dampf entweichen, Verschraubungen verrosten u. s. w.

Kupferdichtungsringe mit Asbest=Graphit=Einlage liefert W. Kempchen sen. Oberhausen, Rheinland. Krügers Dichtungsringe (zu beziehen von Dr. Graffenberger, Charlottenburg=Berlin) bestehen aus durchlöcherten Metallscheiben, welche mit elastischen Dichtungsschnüren durchflochten sind.

Kieselgur=Wärmeschutzmasse liefert Dr. L. Grote (O. Pistor), Ülzen, Bezirk Hannover.

Kondenstöpfe zur Abscheidung von Kondenswasser liefern auch die Gießerei und Maschinenfabrik Oggersheim (Paul Schütze u. Co.), Oggersheim i. d. Pfalz und Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover. Fig. 3886 zeigt einen Apparat der letzteren Firma.

Wenn das Kondenswasser aus der Dampfleitung im Topf bis zur Höhe der Löcher gestiegen ist, ergießt es sich von allen Seiten gleichmäßig in den Schwimmer. Sobald letzterer bis zu einem gewissen

Fig. 3887.

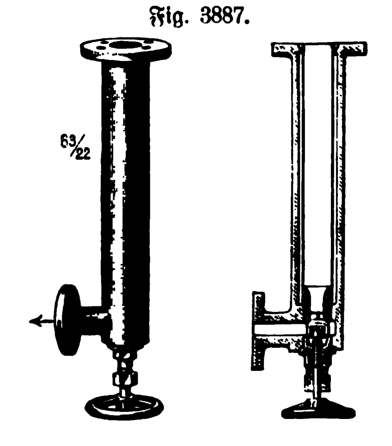


Fig. 3886.

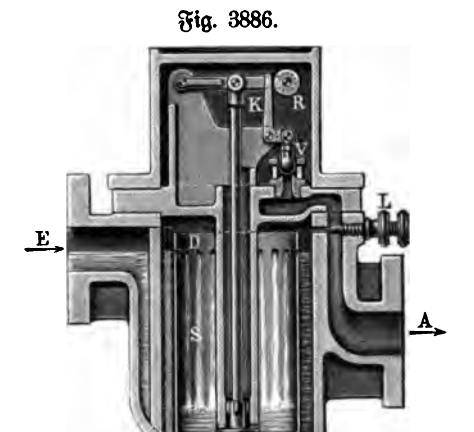
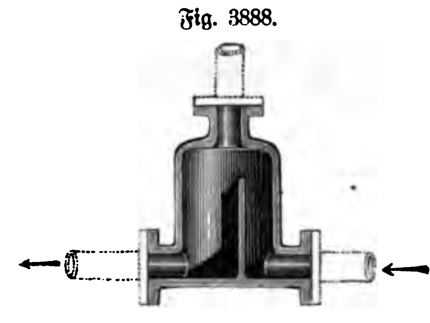


Fig. 3888.



Grade gefüllt ist, sinkt er nieder und zieht die am Ende eines Lenkerarmes durch einen Zapfen befestigte Rolle *R* mit nieder. Diese Rolle übt dadurch einen Druck auf den Hebel *K* aus, an dessen kurzem Arme das Abschlußventil *V* hängt, welches durch den im Topfe herrschenden Druck des Dampfes bisher gegen seinen Sitz gedrückt und geschlossen gehalten wurde.

Fig. 3887 zeigt ein anderes System derselben Firma. Ein Metallrohr, welches am oberen Ende in einem weiteren Gußeisenrohre befestigt ist, ragt mit dem anderen Ende frei in dasselbe hinein und ist dort durch einen Ventilkegel abgedichtet. Dieser Kegel wird nun durch eine Spindel so eingestellt, daß das Ventil eben geschlossen ist, wenn das Metallrohr die Dampfwärme besitzt. Tritt nun Kondenswasser ein, so verkürzt sich durch die geringe Wärme desselben das Metallrohr und das Wasser tritt aus der sich bildenden Spalte zwischen Kegel und Ventil=

sitz aus bis zu dem Zeitpunkt, bei welchem durch erneuten Dampfzutritt wieder Ausdehnung und damit Abdichtung erfolgt.

Um das im Dampfe in Form von Tröpfchen schwebende Wasser abzuscheiden, wird oben auf den Apparat ein „Wasserabscheider“ oder „Dampftrockner“, Fig. 3888, geschraubt, in welchem die Tröpfchen gegen eine vertikale Platte stoßen und an dieser herabfließen.

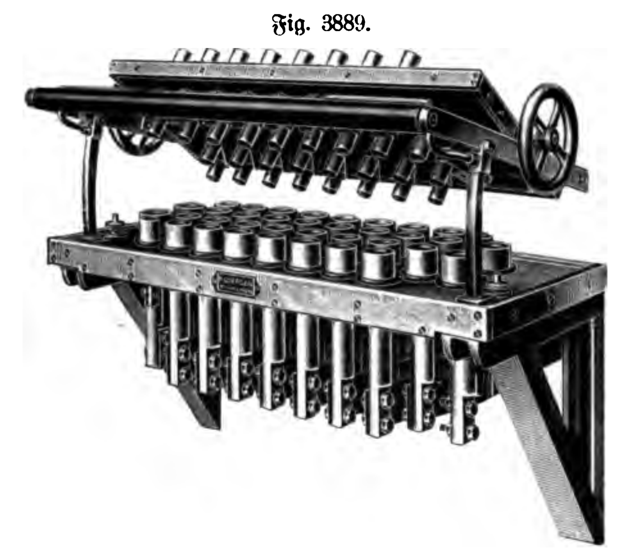
Zu S. 47, § 12. Muffen zum Zusammenlöten von Leitungsschnüren liefern Allut Noodt u. Meyer, Hamburg 8/2.

Zu S. 72, § 15. Pachytrope für starke Ströme nach Fig. 3889 liefert M. Goergen, München X., Ablzreiterstr. 15.

Zu S. 73, § 15. Die Gleichrichter Fig. 124 sind diejenigen, welche Nostiz und Koch fabrizieren (vgl. Bd. II, Kap. 15). Siehe auch Sterzel, Elektrotechn. Zeitschr. 28, 841, 1903.

Zu S. 79, § 16. Elektromotoren und Dynamomaschinen liefert auch A. Ebert, Dresden-Pieschen, Haidestr. 5. Weitere Bezugsquellen sind in Bd. II angegeben.

Fig. 3889.



Zu S. 88, § 17. Der Riemenverbindeapparat Fig. 163 ist zu beziehen von Blume u. Co., Vogelsang i. W. (Preis inkl. 1000 Klammern 16 Mk.).

Zu S. 89, § 17. Riemenscheiben aus Stahlblech liefern die Chemnitzer Stanzwerke in Burgstädt. Sie sind gegen Temperatur- und Feuchtigkeitseinfluß unempfindlich.

Zu S. 91, § 17. Schmierölreiniger liefert Eugen Kreiß, Hamburg.

Zu S. 92, § 17. Zu gleichem Zwecke kann auch Spermazit, zu beziehen von Fr. Dürr Söhne, Fabrik chemischer Präparate, Stuttgart, verwendet werden.

Zu S. 101, § 18. Patent-Präzisions-Gasmotoren liefert Friedr. Krupp, Grusonwerk, Magdeburg-Buckau.

Zu S. 103, § 18. Schnelllaufende Zwillingsturbinen liefert die Maschinenbauanstalt (vorm. Gottschald u. Nötzli) in Golzern in Sachsen.

Zu S. 105, § 19. Windmotoren liefert G. R. Herzog, Dresden-A.; Dampfturbinen die Maschinenbauanstalt Humboldt in Kalk bei Köln a. Rh.

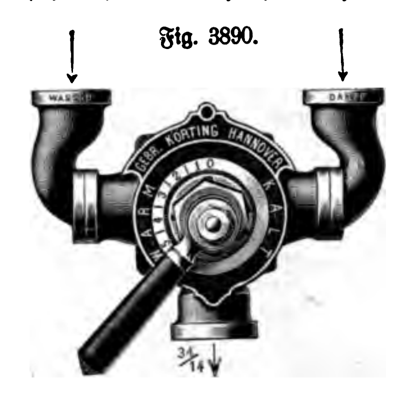
Zu S. 110, § 19. Kohlenbürsten liefern die Planiawerke, Aktiengesellschaft, Ratibor; Blätterbürsten aus Antifriktionsmetall Louis Patz, Dresden, Kyffhäuserstraße 26.

Zu S. 121, § 23. Statische Voltmeter für sehr hohe Spannungen (bis 40000 Volt) liefert die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Berlin. Man kann auch die Pole durch eine Latte verbinden und den Spannungsabfall auf der-

selben zwischen zwei nahegelegenen Punkten elektrometrisch bestimmen, wobei man mit einem statischen Voltmeter für geringere Spannungen ausreicht.

Zu S. 128, § 25. Verdichtungsmaterialien verschiedener Art liefern die Siemens-Schuckertwerke, Berlin. Wilh. Kempchen sen., Oberhausen, Rheinland, liefert Kompositionsdichtungsringe, sowie wellenfömige Metalldichtungsringe ohne oder mit Asbestgraphiteinlage, ebenfalls für höchsten Druck. Hydraulische Pressen größter Art liefert Friedr. Krupp, Grusonwerk, Magdeburg-Buckau.

Fig. 3890.

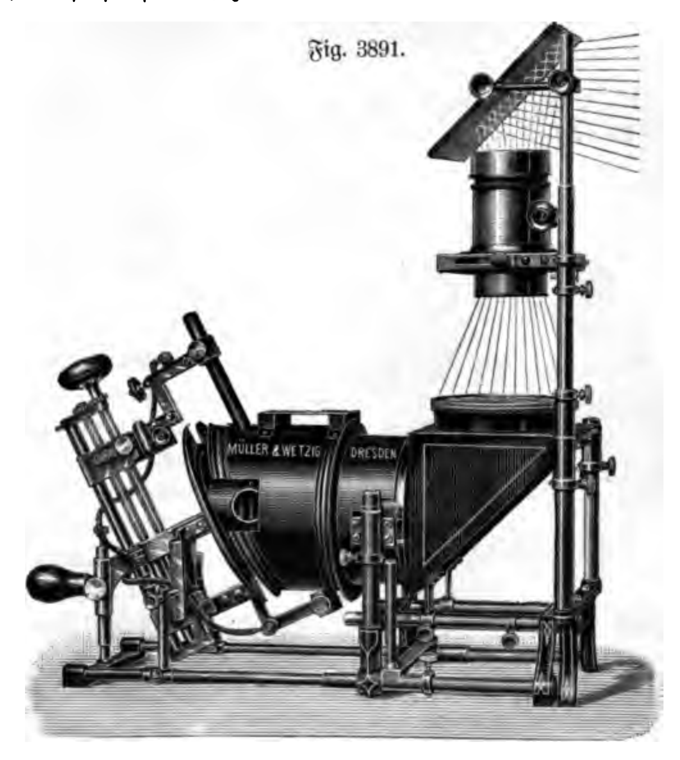


Zu S. 137, § 31. Mischapparate für warmes und kaltes Wasser oder Wasser und Dampf nach Fig. 3890 liefern Gebr. Körting in Körtingsdorf bei Hannover.

Zu S. 153, § 38. Haustelephone liefert auch die Fonos-Gesellschaft, Berlin SW., Lindenstraße 16/17.

Zu S. 183, § 42. Einen Projektionsapparat, bei welchem nur die Kohlenspitzen in das Laternengehäuse hineinragen (Fig. 3891) liefern Meiser u. Mertig, Dresden N., Kurfürstenstr. 27, zu 330 Mk.

Fig. 3891.



Zu S. 208, § 43. Über Heliostaten siehe auch Gray, Z. 17, 25, 1904 und den Katalog „Projektion" von Leybolds Nachf., S. 322.

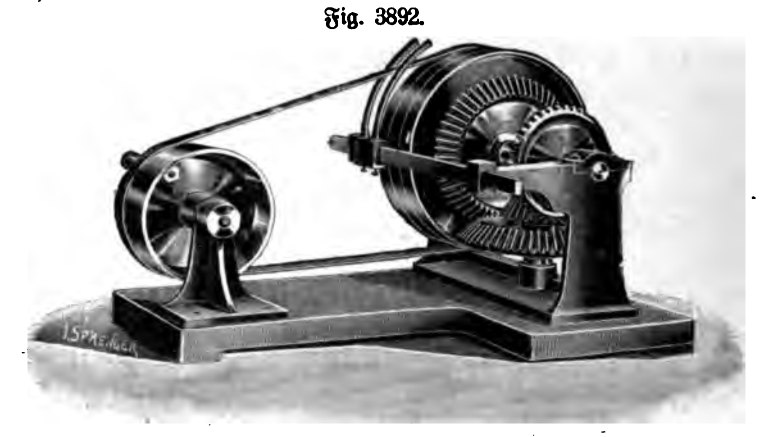
Zu S. 228, § 45. Bogenlampen für Gleich- und Wechselstrom liefert Helios, Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, Köln-Ehrenfeld.

Zu S. 231, § 45. Kohlenstifte, speziell **Effektkohlen** liefern auch Förster u. Leuchtag, Berlin, Brückenstr. 13.

Zu S. 233, § 45. Glühlampen mit Vorrichtung zum **Kleinstellen** (mit zwei Kohlenfäden) liefert E. Kahle, Frankfurt a. M., Gutleutstr. 1.

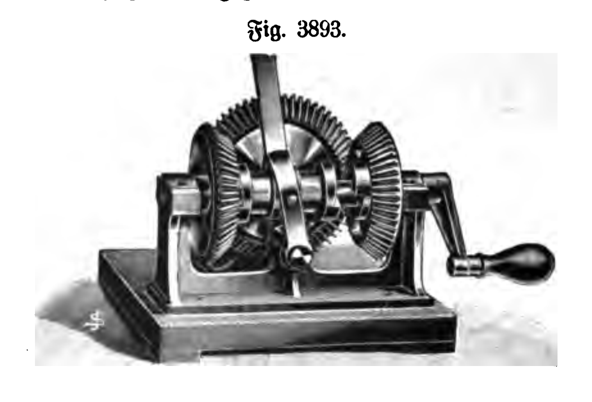
Zu S. 235, § 45. **Aërogengasapparate** liefert die Aërogengasgesellschaft Hannover. **Osmium-Glühlichtlampen** liefert die deutsche Gasglühlicht-Aktiengesellschaft, Berlin SW., Alte Jakobstr. 139; **Tantal-Glühlichtlampen** Siemens u. Halske, Berlin.

Fig. 3892.



Zu S. 315, § 61. Modelle von Vorrichtungen, um den Drehungssinn zu ändern, zeigen die Fig. 3892 Lb, 170 und 3893 Lb, 160, s. a. Fig. 2049, S. 656.

Fig. 3893.



Zu S. 320, § 62. Marine-Scheuertuch aus Baumwolle liefert S. Goosmann, Bremen, Langenstr. 115. E. M. Raetz, Berlin N. 20, fabriziert Putztücher aus Rohseidenabfall. Verschiedenartige Scheuer- und Staubtücher sind zu haben bei Schoelzke u. Gen., Vereinigte Lausitzer Handweber, Linderode Nr. 96 (Lausitz). Ein Dutzend halbweißer Handtücher mit roter Kante kostet 3,40 Mk.

Zu S. 321, § 62. Beim Reinigen eines **Uhrwerkes** mit Feder ist durchaus nötig, daß man dasselbe zunächst ganz ablaufen läßt oder die Feder entspannt, da anderenfalls beim Zerlegen die einzelnen Rädchen mit Gewalt nach allen Richtungen umhergeschleudert, verbogen und zerbrochen werden.

Zu S. 326, § 63. Säure- und alkalifeste, mattschwarze Färbung von Tischplatten übernehmen Leppin u. Masche, Berlin. Die Imprägnierung kostet 5 bis 6 Mk. pro Quadratmeter.

Um Apparate wie Strommesser, Konsolen u. s. w. leicht an der Wand anbringen und entfernen zu können, kann man parallele, horizontale Schienen, so-

genannte Apparateleisten, dauernd daran befestigen, zwischen welche sich Brettstücke einschieben lassen, auf welchen die betreffenden Apparate angebracht sind (Hochenegg, Elektrotechn. Institut in Wien).

Zu S. 346, 65. Zum Aufbewahren von Manuskripten, Wertgegenständen wie Platin, historisch merkwürdigen Sachen u. s. w. benutze ich einen größeren Kassenschrank, hauptsächlich zur Aufnahme von Büchern eingerichtet, bezogen von W. Schindler, Schlosser, Karlsruhe, Hirschstr. 42, Preis etwa 600 Mk.

Fig. 3894.



Fig. 3896.



Um ein Zimmer gegen den Eintritt Unberufener zu schützen, kann man in das Türschloß eine sogenannte „Schloßsicherung" einsetzen lassen, wodurch das Öffnen mit Dietrich unmöglich wird, zu beziehen von der Berliner Türschließerfabrik Schubert u. Werth, Berlin C., Prenzlauerstr. 41. Dieselbe Firma liefert pneumatische und hydraulische automatische Türschließer.

Fig. 3895.



Fig. 3897.



Um rasch im Dunkeln Schriftstücke, Bücher u. s. w. aufsuchen zu können, sind elektrische Taschenlampen bequem, beispielsweise zu beziehen von Meteor, Kontinental-Gasglühlicht-Gesellschaft, Berlin N., Brunnenstr. 144.

Zu S. 346, § 65. Im Zimmer des technischen Assistenten befindet sich zweckmäßig auch ein Verbandskasten. Über Unfälle bei chemischen Unterrichtsversuchen siehe Z. 17, 115, 1904. Zweckmäßig sind Unfall- und Haftpflichtversicherung aller bei Experimenten beteiligter Personen. Bei staatlich angestellten Personen trifft natürlich die Haftpflicht den Staat, vorausgesetzt, daß nicht die Disziplinaruntersuchung ergibt, der Betreffende habe den Kreis seiner Verpflichtungen überschritten. Meist dürfte aber dieser nicht genügend scharf bestimmt sein, um für alle Fälle gesichert zu sein. Die Unfallversicherung, auch von Zuhörern bezw. Schülern, wird in der Regel von den Anstalten übernommen.

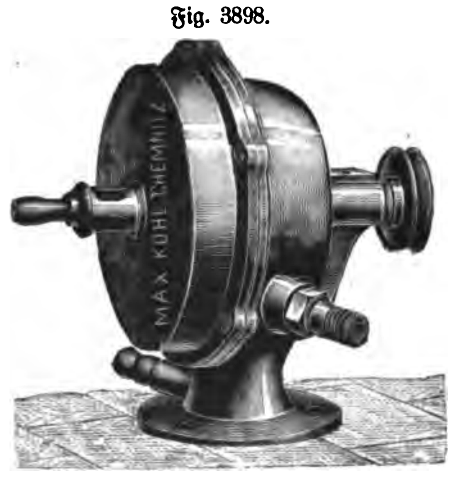
Zu S. 352, § 66. Monopol-Rechenmaschinen liefern **Schubert u. Salzer**, Maschinenfabrik, Aktiengesellschaft, Chemnitz, zu 390 bis 950 Mk.; billige Rechenmaschinen (zu 35 Mk.) **Justin Wm. Bamberger u. Co.**, Präzisionsmaschinenfabrik, München I; **Additionsmaschinen** (Preis 20 Mk.) nach Fig. 3894 die Adix-Kompanie, Mannheim.

Zu S. 354, § 67. Zeichentische zur Herstellung großer Zeichnungen nach Fig. 3895 liefert **Albert Martz**, Stuttgart; solche nach Fig. 3896 u. a., sowie Schränke für Zeichnungen nach Fig. 3896 **Liebau u. Co.**, Berlin W. 9, Potsdamerstraße 10/11.

Zu S. 358, § 67. Große Lichtpausapparate liefern auch **Liebau u. Co.**, Berlin W., Potsdamerstr. 10/11.

Zu S. 359, § 67. Verschiedene lichtempfindliche Papiere (Mimosafabrikate) liefert die Rheinische Emulsionspapierfabrik, Köln-Ehrenfeld, Geisselstr. 90/92.

Fig. 3898.



Zu S. 369, § 68. **Farbenempfindlichste** Momentplatten nach **Miethe** u. **Traube** (mit Äthylrot sensibilisiert) liefert **Otto Perutz**, Trockenplattenfabrik, München.

Zu S. 374, § 69. Zum Lackieren des Fußbodens empfiehlt sich der polymerisierte Lack von **Kronstein**, zu beziehen von der Elektralackfabrik in Bruchsal, welcher weitaus haltbarer und dabei billiger ist als gewöhnlicher Lack.

Zu S. 468, § 71. Größere **Windöfen** zum Schmelzen von Metallen liefert **W. Schuen**, Werkstätten für elektrische Öfen und Apparate, Aachen.

Ein transportables **Gasgebläse** mit Turbine für Dampf-, Wasser- oder Schnurbetrieb zeigt Fig. 3898 K, 67.

Zu S. 513, § 73. Siehe auch das Buch: An der Hobel- und Drehbank, Union, Deutsche Verlagsgesellschaft, Stuttgart.

Zu S. 537, § 74. Fassonstücke für Isolierzwecke liefert **M. Pape**, Berlin O., Pallisadenstr. 49.

Zu S. 543, § 74. Pneumatische Tünch- und Anstreichmaschinen liefert das Institut für Gewerbehygiene, Berlin NW. 21, Alt-Moabit 106.

Zu S. 545, § 74. Elektro-Isolierlack liefert auch **Johannes Forrer**, Lackfabrik, Mannheim.

Zu S. 559, § 75. Über Austrocknen von Flaschen mit Schwefelsäure siehe **Rebenstorff**, Z. 17, 159, 1904.

Zu S. 568, § 75. Hochdruckventile für Stahlflaschen, welche in allen Teilen aus Metall bestehen, liefert das Berliner Kohlensäurewerk Dr. **M. Stern**, Berlin-Charlottenburg, Salzufer 8.

Zu S. 595, § 78. Präzisions-Uhr- und Laufwerke, sowie Räder, Triebe, Zahnstangen u. s. w. liefert **Otto Lindig**, Glashütte, Sachsen.

Zu S. 603, § 78. Über Teilmaschinen siehe auch Buch der Erfindungen, Bd. VI, S. 372 und 373. Leipzig 1900, Spamer. Kreisteilmaschinen liefert auch J. Amsler-Laffon u. Sohn, Schaffhausen.

Zu S. 603, § 78. Sehr feinen Messingdraht zum Aufhängen von Glockenmagneten u. s. w. liefert auch die Fabrik von Hättlinger in Schwabach. H. Abraham stellt sehr dünne Drähte durch elektrolytische Ätzung in sehr verdünnten Lösungen mit sehr schwachen Strömen her.

Zu S. 630, § 81. Einen „ewigen Kohlenanzünder" liefert Jacques Kellermann, Beleuchtungsneuheiten, Berlin N., Brunnenstr. 194. Friedr. Dürr Söhne, Chemische Fabrik, Stuttgart, liefern folgende Reinigungsutensilien: Putzwolle weiß zu 55 bis 85 Mk. pro 100 kg, bunt zu 40 bis 70 Mk.; waschbare Putztücher aus Seiden- und Baumwollabfällen das Groß zu 22 Mk.; Reinigungsöl für Treibriemen 1,80 Mk. pro Liter; Riemenadhäsionsfett 2 Mk. pro Kilogramm; Rostentfernungsmittel „Rapid" 2,80 Mk. das Kilogramm; Putzessenz „Gloria" 2,50 Mk. pro Liter; Rostschutzmittel „Antisol" (für alle Metalle gegen Oxydation verwendbar) 2,80 Mk. das Liter; Mittel zur Lösung von Kesselstein „Pyrin" 2,50 Mk. das Kilo.

Abteilung 2:

Zu S. 639, § 3. Über „Radiant" siehe Z. 7, 211, 1894.

Zu S. 641, § 4. Über Raummessung siehe F. Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, 10. Aufl., Leipzig 1905, Teubner, S. 93 u. ff.

Zu S. 647, § 10. Über Zeitmessung siehe auch F. Kohlrausch, a. a. O., S. 114 u. ff.

Zu S. 688, § 40. Über den Gebrauch der Wage siehe auch F. Kohlrausch, a. a. O., S. 51 u. ff.

Zu S. 733, § 64. Statt Gel ist Gal zu setzen, vergl. S. 1216 Anmerkung.

In Karlsruhe ist 1 Megadyne ungefähr . .	= 1 Kilogramm	+ 19,4 Gramm
Am Nordpol „ „ „ „ . .	= 1 „	+ 17,1 „
Am Äquator „ „ „ „ . .	= 1 „	+ 22,5 „

Zu S. 734, § 64. Die CGS-Einheit der Arbeit heißt Erg. Die Elektrotechniker gebrauchen als Arbeitseinheit das Joule (oder die Wattsekunde) = 10^7 Erg, d. h. die Arbeit der Kraft 10^5 Erg auf dem Weg 1 m. Es wäre deshalb zweckmäßig die Kraft 1/g Kilogramm (Hektokilodyne, Decimegadyne), welche 1 kg die Beschleunigung 1 m/sec pro Sekunde erteilt, als technische Krafteinheit zu benutzen. Solange die Ingenieure das Kilogramm, entgegen der gesetzlichen Bestimmung, nach welcher das Kilogramm die Einheit der Masse ist, wie bisher als Krafteinheit gebrauchen, dürfte allerdings eine Änderung unmöglich sein. Dann muß man aber, um konsequent zu bleiben, auch die veränderliche Masseneinheit Hyl (eine von F. Emde vorgeschlagene Bezeichnung für die technische Masseneinheit, d. h. die Masse 9,81 kg, siehe S. 741) benutzen. Ich habe mit Absicht an verschiedenen Stellen von dieser Einheit Gebrauch gemacht, um das Unhaltbare der gegenwärtigen Sachlage möglichst klar zu stellen. Mit Recht macht F. Emde darauf aufmerksam, daß der bisherige Mangel eines Namens für die technische Masseneinheit und deren

Verwechselung mit dem Kilogramm ein Hauptgrund ist, weshalb sich ein namentlich für den Lehrer der Physik äußerst lästiger und den Unterricht außerordentlich schädigender, verkehrter Gebrauch bis heute erhalten konnte (s. a. ETZ 25, 432, 1904).

Zu S. 752, § 77. Ein Molekülmodell nach Körner-Hartl (Fig. 3899) liefern W. J. Rohrbecks Nachf., Wien I, Kärntnerstr. 59, zu 36 Kronen.

Fig. 3899.



Zu S. 771, § 102. Eine Materialprüfungsmaschine von Mohr u. Federhaff mit Apparat zur selbsttätigen Bedienung der Laufgewichtswage mittels elektrischen Antriebes zeigt Fig. 3900.

Zu S. 772, § 103. Ein Sklerometer zum Bestimmen der Härte von Kristallen in verschiedenen Richtungen durch Ritzen mit einer Stahl- oder Diamantspitze nach Fig. 3901 liefern Voigt u. Hochgesang (R. Brunnée) in Göttingen zu 220 Mk.

Zu S. 782, § 120. Kleine Eimerkünste, Schöpfwerke, Elevatoren, Baggerwerke u. s. w. als Spielzeug liefern Wachenfeld u. Schwarzschild, Kassel, Grüner Weg 9. (Vgl. auch S. 670, § 25.)

Zu S. 792, § 126. Richards und Stull (Beibl. 28, 952, 1904) schlagen als Druckeinheit das Megabar vor, d. h. den Druck einer Megadyne pro Quadratcentimeter (= 0,987 55 Atmosphären).

Zu S. 803, § 134. Fig. 3902 zeigt eine hydraulische Materialprüfungsmaschine mit Biegeapparat von Mohr u. Federhaff, Maschinenfabrik, Mannheim.

Zu S. 813, § 142. Rebenstorff (Z. 17, 290, 1904) bestimmt die Druckfestigkeit von Glasgefäßen, indem er sie an die Wasserleitung anschließt, was voraussetzt, daß diese genügend starken Druck hat. Die Änderung des Drucks bewirkt man dadurch, daß man einen zweiten Hahn mehr oder minder stark offen läßt.

Zu S. 819, § 147. Den in Fig. 3903 dargestellten Apparat zum Nachweis des Auftriebes nach Hartl liefern W. J. Rohrbecks Nachf. in Wien I, Kärntnerstraße 59, zu 4 Kronen. Beim Einsenken des unten mit einer elastischen Membran verschlossenen, mit gefärbtem Wasser gefüllten Gefäßes in das große Wassergefäß bleibt die Membran eben in der Stellung 2, während sie in der Stellung 1 ausgebaucht, in der Stellung 3 eingedrückt erscheint.

Fig. 3900.

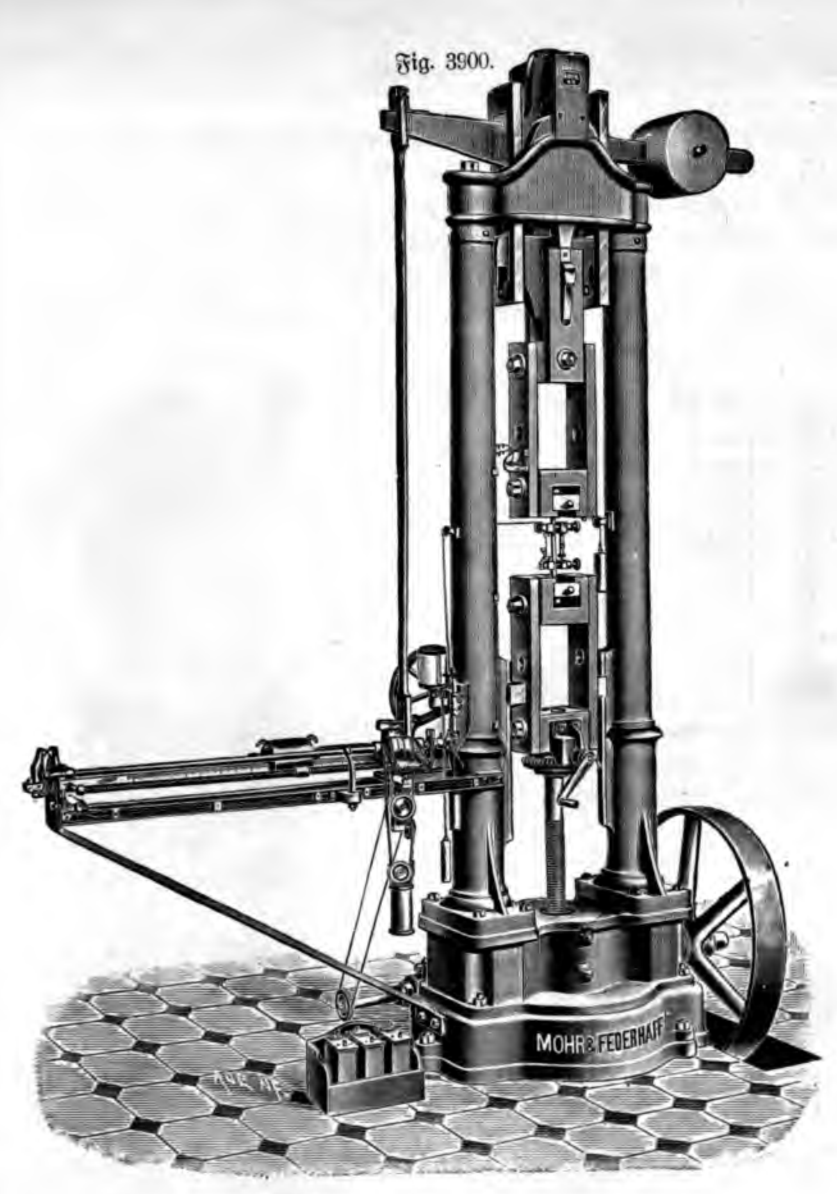
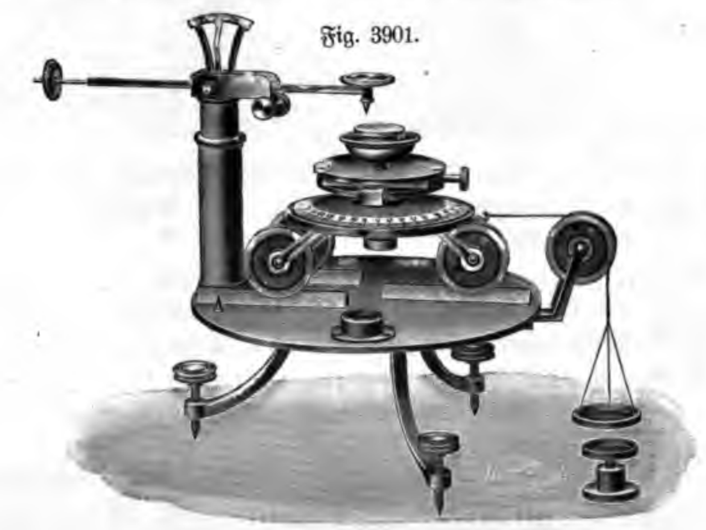


Fig. 3901.

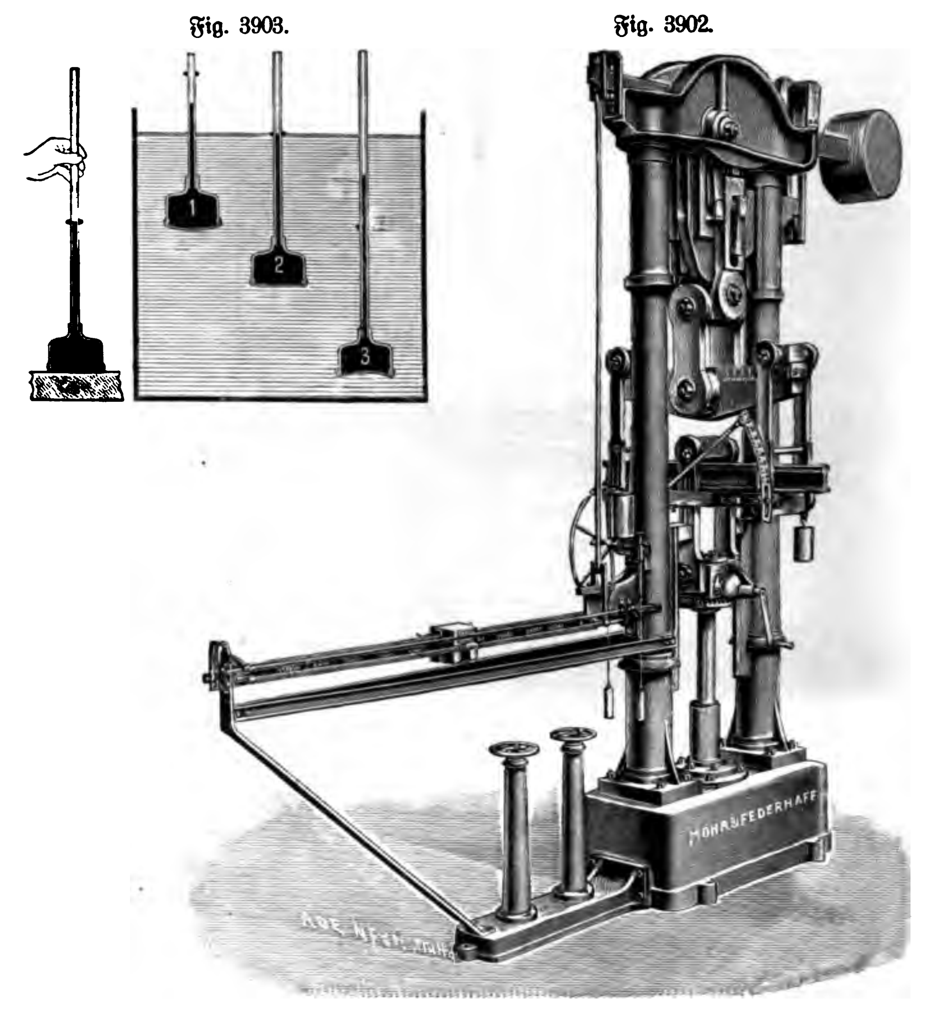


Zu S. 829, § 154. Über ein Pyknoaräometer siehe auch Rebenstorff, Z. 17, 283, 1904.

Zu S. 829, § 155. Registrierende Wasserstandsanzeiger (Pegelapparate) liefert Otto Behm, Mechaniker, Karlsruhe, Hirschstr. 83.

Zu S. 854, § 179. Einen Apparat zur bequemen Herstellung von Lösungen nach Ubber, Autolysator genannt, Fig. 3904 liefern Dittmar u. Vierth in

Fig. 3903. Fig. 3902.



Hamburg, Spaldingstr. 148. Das Salz befindet sich in dem in Fig. 3904 erkennbaren Sieb und die entstandene schwerere Lösung sinkt alsbald auf den Boden und wird durch neues Lösungsmittel ersetzt.

Zu S. 881, § 216. Nach Vanino u. Hartl (Beibl. 29, 369, 1905) gibt eine verdünnte Goldchloridlösung mit alkoholischer Phosphorlösung versetzt rote, haltbare kolloidale Goldlösung. Auch Kohlenoxyd dient zu gleichem Zweck.

Zu S. 889, § 226. Die Kompressibilität beträgt 1 CGS, wenn der Druck 1 CGS (1 Dyne) eine Volumenverminderung von 1 CGS (1 ccm) pro 1 CGS (1 ccm) des Volumens bewirkt.

Zu S. 892, § 229. Rebenstorff (Z. 18, 17, 1905) benutzt einen Collodiumballon, um die Existenz der Luft nachzuweisen.

Zu S. 904, § 236. Das spezifische Gewicht x der Luft ergibt sich durch folgende Betrachtung: Bei Erhebung um 10,5 m sinkt der Barometerstand um 0,001 m, somit ist $x : 13{,}6 = 0{,}001 : 10{,}5$, $x = 0{,}001\,29$.

Zu S. 906, § 238. Rebenstorff (Z. 18, 18, 1905) verschließt das Ende eines Hebers durch einen Collodiumballon, so daß derselbe einen statischen Apparat darstellt. Füllen und Entleeren sehen scherzhaft aus.

Fig. 3904.

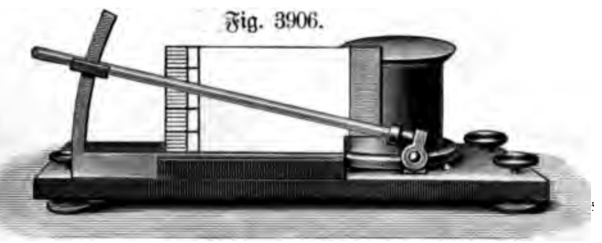


Fig. 3905.



Zu S. 947, § 252. Eine praktische Verwertung des Luftdruckes ist die Vakuumfiltration (Fig. 3905), wobei der Trichter luftdicht auf eine evakuierte Flasche aufgesetzt wird. Zur Abdichtung dient nach Pip zweckmäßig eine Kautschukplatte mit Loch zum Durchstecken des Trichters (zu beziehen von den vereinigten Fabriken für Laboratoriumsbedarf Berlin N., Chausseestr. 3).

Fig. 3906.



Zu S. 962, § 262. Fig. 3906 zeigt ein Differentialmanometer nach Recknagel (s. unten Nachtrag zu S. 1001).

Zu S. 972, § 268. Reduzierventile mit Absperrvorrichtung liefern Nachtigall u. Jacoby, Armaturenfabrik, Leipzig.

Zu S. 977, § 270. Über den Nachweis des aerostatischen Auftriebes siehe auch Rebenstorff, Z. 18, 17, 1905.

Zu S. 990, § 283. Rebenstorff, Z. 18, 17, 1905, benutzt zum Nachweis der Zusammendrückbarkeit der Gase Collodiumballons, auf welche von außen veränderlicher Druck ausgeübt wird.

Zu S. 990, § 284. Rusch (Z. 18, 28, 1905) benutzt zum Nachweis des Mariotteschen Gesetzes Variation des Drucks einer Quecksilbersäule durch Neigen der Röhre.

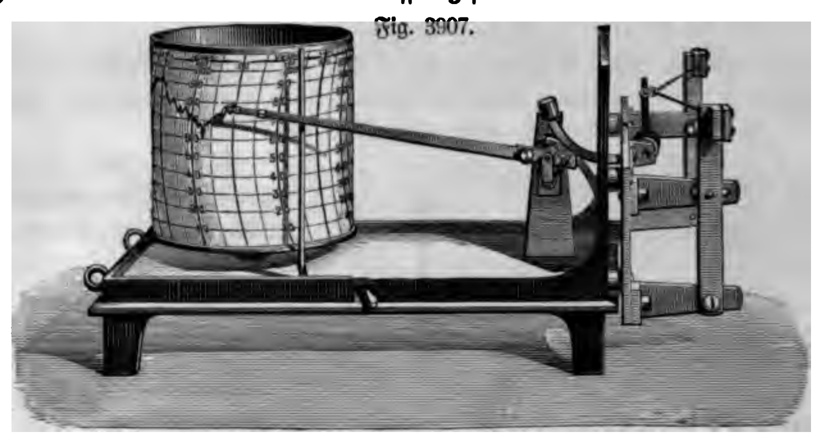
Zu S. 997, § 287. Die Sauerstofffabrik Berlin liefert keine Finimeter (vgl. Bd. I, S. 202, Anmerkung 2), sondern nur „Inhaltsmesser", d. h. Hochdruckmanometer.

Zu S. 1001, § 291. Das Differentialmanometer nach Recknagel kostet nicht 80 sondern 200 Mk.

Zu S. 1005, § 302. Über Nachweis der Gasdiffusion durch Tonplatten mit Collodiumballon siehe Rebenstorff, Z. 18, 16, 1905.

Zu S. 1029, § 325. Rebenstorff (Z. 18, 18, 1905) zeigt das Verdunsten durch Membranen mittels eines mit Wasser gefüllten Collodiumballons.

Fig. 3907.



Zu S. 1039, § 336. Fig. 3907 K, 160 zeigt ein selbstregistrierendes Hygrometer, dessen Trommel sich in sieben Tagen einmal umdreht.

Fig. 3908.



Zu S. 1050, § 343. Fig. 3908 K, 210 zeigt ein Registrierthermometer mit 1 bis 3 m langem biegsamem Verbindungsrohr.

Zu S. 1073, § 368. Der Regulator Fig. 2895 von **P. Lequeux**, Paris, 64 Rue Gay Lussac, wird nicht mehr hergestellt.

Zu S. 1081, § 373. Dampfkochtöpfe liefert **Chr. Umbach**, Bietigheim 5 (Württemberg).

Zu S. 1082, § 373. Die Dampftöpfe (S. 1082) sind nicht auf 15, sondern nur auf 5 Atm. geprüft.

Zu S. 1090, § 381, Anmerkung 1. Statt G. Rösche ist zu setzen Grösche.

Zu S. 1141, § 423. Statt Kolophonium wird besser Xylol oder Propylalkohol benutzt.

Zu S. 1119, § 400. Die Adresse von **Elliott Brothers** ist jetzt London, 36 Leicester Square.

Zu S. 1159, § 450. Die eigentliche Pharaoschlange besteht aus Rhodanquecksilber in Stanniol eingewickelt.

Zu S. 1200, § 482. Über Wärmeentwickelung bei Absorption von Gasen siehe auch Z. f. Instrum. 24, 364, 1904.

Zu S. 1213, § 492. Der Brennwertmesser von Junkers dient speziell zur Bestimmung der Verbrennungswärme von Gasen. Er besteht aus einem doppelwandigen cylindrischen Blechgefäß, in dessen Mitte der Brenner für das zu untersuchende Gas angebracht ist, welches durch einen geeichten Gasmesser zugeleitet wird. Die Wärme wird von dem den Hohlraum zwischen beiden Wänden durchströmenden Wasser aufgenommen. Ist, nachdem sich stationärer Zustand hergestellt hat, T die Differenz der Temperaturen des Wassers beim Austritt und Eintritt, W die mittels eines vorübergehend vorgehaltenen Maßcylinders aufgefangene Wassermenge in Kilogramm, G die in derselben Zeit an dem Gasmesser abgelesene ausgeströmte Gasmenge in Cubikmetern und x die gesuchte Verbrennungswärme pro Cubikmeter, so ist $x \cdot G = W \cdot T$ oder $x = W \cdot T/G$. Beispielsweise war $W = 1{,}717$ kg, $G = 0{,}01$ cbm, $T = 29{,}27^{\circ}$, also $x = 1{,}717 \cdot 29{,}97/0{,}01 = 5145$ Kalorien pro Cubikmeter.

Zur Eichung des Gasmessers liefert dieselbe Firma einen kleinen Aspirator, welcher genau 1 Liter Luft durchzusaugen gestattet.

Zu S. 1256, § 517. Zu erwähnen wäre auch Henglers Pendelwageversuch. Da die Zentrifugalkraft die Richtung des Radius des Parallelkreises hat und diese auf unserer Halbkugel von dem Radius der Erde nach Süden abweicht, so wird ein Horizontalpendel stärker nach Süden abgelenkt werden, wenn das Gewicht an einer Schnur in die Höhe gezogen wird, da dort die Zentrifugalkraft größer ist.

Zu S. 1262, § 527. Abänderungen des Apparates für Änderung der Rotationsgeschwindigkeit mit dem Radius beschreibt Holtz, Z. 18, 161, 1905.

Zu S. 1351, § 591, Fig. 3441. Siehe auch Gray, Lehrb. d. Physik, Braunschweig 1904, Bd. I, S. 61.

Zu S. 1384, § 616. Die Ausflußgeschwindigkeit kann auch als 1 CGS bezeichnet werden, wenn in 1 Sekunde 1 g ausfließt. Die entsprechende technische Einheit ist 1 Hyl pro Sekunde.

Zu S. 1557, § 755. Über die Erklärung der Wärmeleitung in Metallen durch Diffusion von Elektronen siehe H. A. Lorentz, Elektrotech. Zeitschr. 26, 584, 1905 oder Ergebnisse und Probleme der Elektronentheorie, Berlin 1905, Springer.

Zu S. 1587, § 776. Siehe ferner Börnstein, Z. 18, 149, 1905.

L.

M.

S.

T.



Alphabetisches Sachverzeichnis.

C.

D.

E.

F.

G.

N.

Q.

S.

T.

Z.



Ankündigungen*)

empfehlenswerter Firmen

Dr. J. Fricks

Physikalische Technik

Siebente Auflage

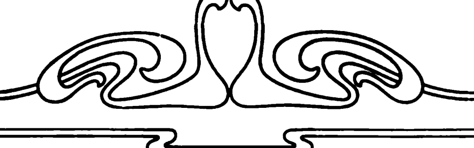
herausgegeben von

Professor Dr. Otto Lehmann

in Karlsruhe i. B.

Erster Band Zweite Abteilung

*) Zusammengestellt unter Verantwortlichkeit der Verlagshandlung.



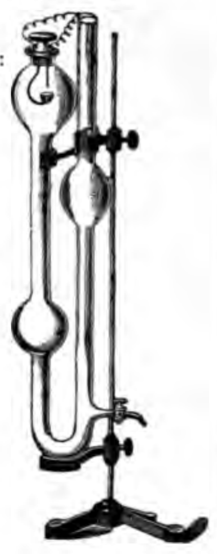
Alphabetisches Verzeichnis der Inserenten.

Gustav Müller,

Präzisions-Glasinstrumentenfabrik,

Jlmenau i/Thür.,

fertigt preiswert und in bester Ausführung:



Physikalische Glasapparate •

Thermometer • • • • • • • •

Hohlglasartikel und sonstige Gebrauchsgegenstände für **Physik** und **Chemie.**

Apparate nach speziellen Angaben und

Neukonstruktionen

nach Skizze und Beschreibung werden in sachgemässer Weise ausgeführt.

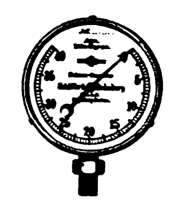
Auf Wunsch Preisliste.

Schäffer & Budenberg (G. m. b. H.),

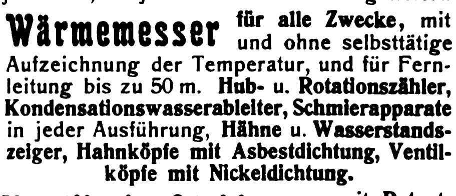
Maschinen- und Dampfkessel-Armaturenfabrik,

Magdeburg-Buckau.

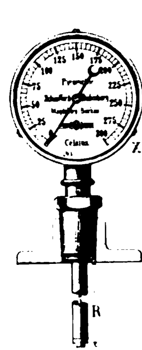




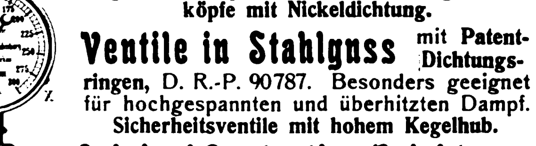
Manometer und Vakuummeter jeder Art, bis jetzt über 3500000 St. geliefert.



Wärmemesser für alle Zwecke, mit und ohne selbsttätige Aufzeichnung der Temperatur, und für Fernleitung bis zu 50 m. **Hub- u. Rotationszähler, Kondensationswasserableiter, Schmierapparate** in jeder Ausführung, **Hähne u. Wasserstandszeiger, Hahnköpfe mit Asbestdichtung, Ventilköpfe mit Nickeldichtung.**







Ventile in Stahlguss mit **Patent-Dichtungsringen**, D. R.-P. 90787. Besonders geeignet für hochgespannten und überhitzten Dampf. **Sicherheitsventile mit hohem Kegelhub.**

Original-Restarting-Injektoren, etwa 150000 Stück im Betriebe.

Elevatoren * Regulatoren * Indikatoren * Pulsometer usw. usw.

Kompressoren (Syst. Kryszat).

Dehnungsstopfbuchsen (Pat. L. Hochstein).

Schwungradlose Dampfpumpen (Patent W. Voit).

Central-Werkstatt, Dessau

der Deutschen Kontinental-Gas-Gesellschaft

Gegründet 1872 **Spezialfabrik für Gasapparate** Gegründet 1872

empfiehlt ihre bewährten

Bunsenbrenner für Laboratorien, Kochkessel mit Gasheizung, Einzelbrenner für Kesselfeuerungen mit Gas, sowie **Gas-Schnell-Wassererhitzer „Askania-Therme“.**



Die Bedienung unserer neuen Schnell-Wassererhitzer **„Askania-Therme“** mit selbsttätiger Zündvorrichtung ist die denkbar einfachste.

Durch bloßes Öffnen bzw. Schließen des Wasserventiles wird das Gasventil selbsttätig geöffnet bzw. geschlossen und der Brenner unter Benutzung einer Zündflamme angezündet bzw. gelöscht. Der Apparat gibt **sofort nach Entzünden der Gasflamme warmes, heißes und auch kochendes Wasser.**

Alle wasserbespülten Teile sind a. verzinntem Kupferblech bzw. Messing hergestellt.

Einfache Konstruktion. Solide Ausführung. Billige Preise.

Sämtliche Teile sind zerlegbar und leicht zu reinigen, eventuell auch bequem auswechselbar.

Unsere Fabrikate sind durch alle besseren Installationsgeschäfte zu beziehen.

Wir bitten zu adressieren: **Verwaltung der Central-Werkstatt Dessau.**



Optisches Institut

C. Reichert

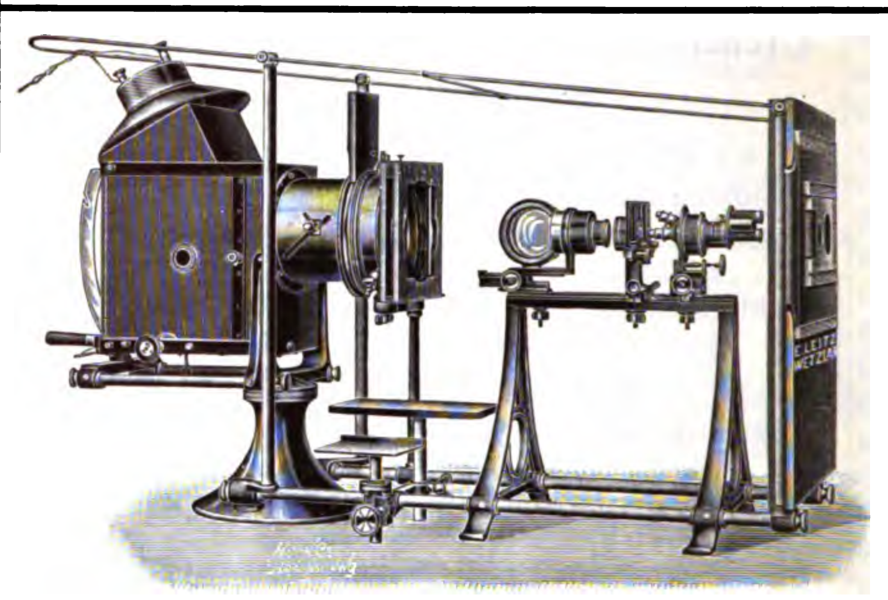
Wien, VIII., Bennogasse 24 und 26.

Spezialität:

Mikroskope I. Qualität
Mikrotome
Haemometer
Polarisations- und Projektions-Apparate
Neue photogr. Objektive.



Kataloge werden den P. T. Interessenten auf Verlangen gratis und franko zugesendet.



Universal-Projektionsapparat für Mikro-, Episkop- u. Diapositiv-Projektion.



Fabrik seit 1880.

Wo es an **Kohlengas** fehlt, erhält man als einzigen und billigsten Ersatz

Gas für **chem. Laboratorien**
„ **technische Zwecke**
„ **Beleuchtung**

durch **Gasolin-Gasapparat „Automat“** (Luftgas).

Dieser **Gasbereiter** kann überall, auch im **Laboratorium und im Wohnzimmer** aufgestellt werden und arbeitet selbsttätig, geräuschlos und geruchlos. Größen sind für Leistungen bis 12 und bis 200 Bunsenbrenner oder Glühlichter.

P. v. Richter, Berlin SW., Tempelhofer Ufer 8.

Export nach allen Weltteilen.



Engros

Ehrhardt & Metzger Nachf.

(K. Friedrichs),

Fernsprecher 730. • **Darmstadt.** • Fernsprecher 730.

Fabrik chemischer u. physikalischer Apparate.

Mechanische Werkstätten • **Tischlerei** • **Glasbläserei**

liefert

Vollständige Einrichtungen

chemischer u. physikalischer Kabinette.

Spezialität:

Elektrische Apparate.

Kataloge auf Wunsch.

Export.


Warmbrunn, Quilitz & Co.
Berlin.
Sämtliche Apparate für den physikalischen und chemischen Unterricht.
Ausführliche, reich illustrierte Preisliste steht zu Diensten.

Dr. Hermann Rohrbeck

vorm.: **J. F. Luhme & Co.**

Gegründet 1825. **Gegründet 1825.**

Karlstr. 20a. **Berlin NW. 6.** Karlstr. 20a.

Fabrik und Lager
aller

Apparate und Utensilien

für

Chemie, Bakt., Pharmazie, Physik u. Technik.

Sämtliche Apparate zur Ausführung der Versuche in „Fricks Physikalische Technik".



„Heliodrom", ein Apparat zur Veranschaulichung der scheinbaren Bewegung der Sonne über einem Horizonte von beliebiger geographischer Breite, von Prof. Jos. Simla.

Wenzel Grund,

Mechaniker und Optiker,

Prag

Myslikgasse u. Ecke Zderaz 1275—II.,
Lieferant der k. k. hydrographischen Landesabteilung, der k. k. Statthalterei in Prag,
empfiehlt sich
den Hoch-, Mittel- u. Bürgerschulen usw.

zur Lieferung von physikalischen, mathematischen u. optischen Instrumenten usw.,

Apparaten eigener Erzeugung
und

Einrichtung physikalischer Kabinette

unter vollster Garantie.

Permanente Ausstellung derselben.

Separate Abteilung

für Konstruierung u. Anfertigung geometrischer Modelle,

als auch deren Ausführung nach gegebener Zeichnung.

Katalog wird auf Wunsch franko zugesandt.





